

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Qendresa Tahiraj

**ANALIZA PERFORMANSI METODE PRIORITETNOG
POSLUŽIVANJA KOD DODJELE KAPACITETA U
VIŠEUSLUŽNIM MREŽAMA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

DIPLOMSKI RAD

**ANALIZA PERFORMANSI METODE PRIORITETNOG
POSLUŽIVANJA KOD DODJELE KAPACITETA U
VIŠEUSLUŽNIM MREŽAMA**

**PERFORMANCE ANALYSIS OF PRIORITY QUEUING
METHOD FOR CAPACITY ALLOCATION IN
MULTISERVICE NETWORKS**

Mentor: dr. sc. Marko Matulin

Student: Qendresa Tahiraj, 0135220243

Zagreb, srpanj 2018.

Sažetak

U ovome radu je provedena analiza vremena čekanja paketa u čvoru višeuslužne mreže u ovisnosti o prosječnoj duljini paketa i njihovom broju, kapacitetu odlaznog linka te disciplini dodjele kapaciteta koja je primijenjena. Za potrebe ove analize napravljene su simulacije rada čvora višeuslužne mreže za slučaj kada je implementirana strategija dodjele kapaciteta *Priority Queuing* (PQ). Na temelju proračuna vremena trajanja posluživanja i vremena završetka posluživanja svakog paketa koji je pristigao u čvor, a koji su svrstani u tri klase prometa, izračunato je vrijeme čekanja svakog pojedinog paketa i prosječne vrijednosti za sve tri simulacije.

Ključne riječi: višeuslužne mreže, *Priority Queuing* (PQ), komutacijski čvor

Summary

In this thesis an analysis of package waiting times in the multi-service network node has been conducted, depending on the average package length and their number, capacity of the outgoing link and the applied discipline for the capacity allocation. For the purposes of this analysis, multi-service network node simulations were performed in case when the capacity allocation strategy of *Priority Queuing* (PQ) is used. Based on the serving time and serving ending time of each packet that has arrived at the node, which are classified into three classes of traffic, it has been calculated the expected waiting time of each packet and the average value for all three simulations.

Keywords: multi-service networks, *Priority Queuing* (PQ), network node

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2.KARAKTERISTIKE VIŠEUSLUŽNIH MREŽA.....	3
2.1. Općenito o višeuslužnim mrežama.....	3
2.2. Arhitektura i razvoj višeuslužnih mreža.....	4
2.1.1. OSI model.....	5
2.1.2. TCP/IP model.....	9
3.ULOGA KOMUTACIJSKOG ČVORA VIŠEUSLUŽNE MREŽE.....	11
3.1. Mrežni čvor.....	11
3.2. Funkcija mrežnog čvora.....	12
3.3. Komutacija kanala.....	14
3.4. Komutacija paketa.....	14
4. ZNAČAJKE METODE PRIORITETNOG POSLUŽIVANJA.....	16
4.1. Metode dodjele pristupa prometnim tokovima.....	16
4.1.1. PQ.....	17
4.1.2. RR.....	18
4.1.3. FCFS.....	19
4.1.4. WFQ.....	19
4.1.5. CBWFQ.....	20
4.1.6. SARR.....	20
4.2. Mreže s prioritetnim čekanjima.....	21
5.GENERIRANJE ULAZNOG TOKA ČVORA PAKETNE MREŽE.....	22
6.ANALIZA PROSJEČNOG VREMENA ČEKANJA PAKETA OVISNO O RAZLIČITIM PROMETNIM OPTEREĆENJIMA.....	25
6.1. Analiza odnosa prometnog opterećenja i vremena čekanja kod prve klase.....	25
6.2. Analiza prosječnog prometnog opterećenja pojedinih klasa.....	27
6.3. Analiza razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje.....	30
7.ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA.....	38
POPIS KRATICA.....	40
POPIS SLIKA.....	42
POPIS GRAFIKONA.....	43

1. UVOD

Internet je prevladavajuća mrežna infrastruktura za emitiranje integriranih telekomunikacija i podatkovnih komunikacija. Multimedijske usluge kao što su IPTV (eng. *Internet Protocol Television*) i VoIP (eng. *Voice over Internet Protocol*) postižu ogroman uspjeh u mnogim zemljama, a broj pretplatnika brzo raste. Prometne karakteristike višenamjenske IP (eng. *Internet Protocol*) mreže nisu dobro poznate jer su potrebni skupovi podataka rijetko dostupni. Brzine prijenosa podataka koje svakodnevno rastu, kako u fiksnim tako i u mobilnim višeslužnim mrežama, imaju veliki utjecaj na razvoj aplikacija koje koriste raspoloživi kapacitet mreže.

Osim toga, na tržištu su prisutni i razni davatelji usluga koji kontinuirano ulažu napore kako bi privukli nove korisnike te zadržali postojeće, tako što nude široki spektar usluga koje su prilagođene korisnicima. Uslijed navedenog, do izražaja dolazi uloga komutacijskog čvorišta u višeslužnim mrežama budući da oni izravno utječu na performanse mreže. Dodjeljivanje kapaciteta pojedinim aplikacijama vrlo je važna funkcija mrežnog čvora. Budući da postoje različite aplikacije, kao i njihovi zahtjevi u vidu mrežnih performansi, važno je odabrati odgovarajuću metodu dodjele kapaciteta kako bi se korisnikova očekivanja ostvarila.

Svrha ovog istraživanja je provođenje analize performansi PQ (eng. *Priority Queuing*) prioritetnog posluživanja kao jedne od metoda dodjele kapaciteta u mrežnim čvorištima. Za definirani skup ulaznih podataka, kao što su vrijeme dolaska paketa u čvor paketne mreže, njihova duljina i kapacitet odlaznog kanala, izračunat će se čekanje pojedinog paketa. Nadalje, analizirat će se veličina prosječnog čekanja paketa pojedine vrste aplikacije za različita prometna opterećenja mrežnog čvora. Cilj istraživanja je utvrditi do koje razine prometnog opterećenja navedena disciplina posluživanja ispunjava specifične QoS (eng. *Quality of Service*) zahtjeve različitih aplikacija.

Diplomski rad se sastoji od sedam poglavlja:

1. Uvod
2. Karakteristike višeslužnih mreža
3. Uloga komutacijskog čvora višeslužne mreže
4. Značajke metode prioritetnog posluživanja
5. Generiranje ulaznog toka čvora paketne mreže
6. Analiza prosječnog vremena čekanja paketa ovisno o različitim prometnim opterećenjima
7. Zaključak.

U drugom poglavlju su navedene najvažnije karakteristike višeslužnih mreža, njihovi nedostaci i prednosti. Nadalje, detaljno je opisan OSI (eng. *Open System Interconnection*) referentni model, slojevi i njihova uloga te su navedeni protokoli koji se na pojedinom sloju koriste (poput, primjerice, najčešće korištenih protokola u Internet mreži: TCP i IP).

Treće poglavlje govori o ulozi komutacijskog čvora višeuslužne mreže u procesu prijenosa podataka. Navedeni su i objašnjeni slojevi mrežnog čvora te dva načela komutiranja informacijskih jedinica kroz informacijsku mrežu, odnosno komutacija kanala i komutacija paketa.

U četvrtom poglavlju je opisana metoda prioritnog posluživanja te njezine prednosti, no isto tako su navedene i opisane i ostale metode posluživanja kod dodjele kapaciteta u višeuslužnim mrežama i njihove značajke.

Peto poglavlje sadrži opis samih značajki koje su korištene pri generiranju ulaznog toka čvora paketne mreže i njihove karakteristike.

U šestom poglavlju je napravljena analiza prosječnog vremena čekanja paketa ovisno o različitim prometnim opterećenjima. Napravljene su tri simulacije od kojih svaka sadrži po tri klase te različite duljine paketa i vremena dolaska paketa u čvor mreže, gdje je cilj bio izračunati vrijeme čekanja pojedinog paketa koji je pristigao u čvor. Dobiveni rezultati su prikazani grafovima.

U sedmom, ujedno i zadnjem, poglavlju je izveden zaključak.

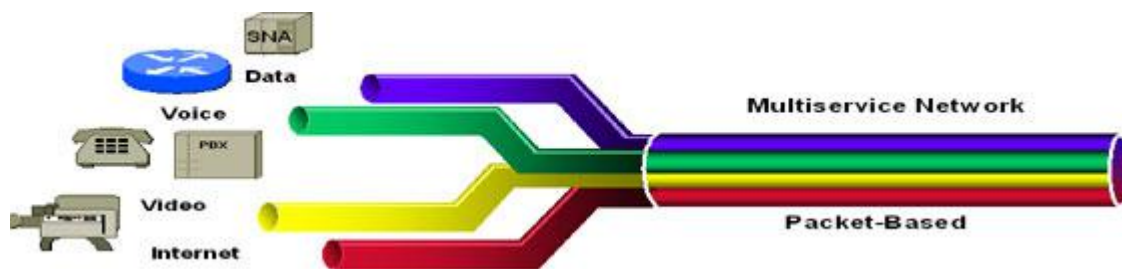
2.KARAKTERISTIKE VIŠEUSLUŽNIH MREŽA

2.1. Općenito o višeuslužnim mrežama

MSN (eng. *Multi-service networks*) višeuslužne mreže pružaju više od jedne vrste komunikacijskih usluga preko iste fizičke infrastrukture. Riječ *multiservice* podrazumijeva, ne samo postojanje višestrukih vrsta prometnih tokova unutar mreže, već i sposobnost jedne mreže da podrži razne aplikacije bez ugrožavanja QoS (eng. *Quality of Service*) kvalitete usluge za bilo koju od njih, što je u konačnici veoma bitno za korisnika. Višeuslužne mreže se prvenstveno mogu pronaći u domeni uspostavljenih pružatelja usluga koji dugoročno pružaju žična ili bežična rješenja za umrežavanje. Početna definicija za višeuslužne mreže je bila konvergirana ATM (eng. *Asynchronous Transfer Mode*) i FR (eng. *Frame Relay*) mreža koja podržava podatke uz kružno baziranu glasovnu komunikaciju. Isto tako prisutne su i nove generacije višeuslužnih mreža koje kombiniraju Ethernet, Layer 3 IP (eng. *Internet Protocol*), VPN (eng. *Virtual Private Networks*) i MPLS (eng. *Multiprotocol Label Switching*) usluge. U središtu pažnje su IP/MPLS (eng. *Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching*) jezgrene mreže, s obzirom na to da se višeuslužne mreže konvergiraju na Layer 2, Layer 3 i višeslojne usluge.

Mnogi mrežni pružatelji su izgrađeni pojedinačno – negdje govorna mreža, negdje Frame Relay mreža, i ATM mreža svugdje kao prijenosnik glasa sljedeće generacije i konvergirane platforme za višeuslužne mreže. Takav način odgovora na zahtjeve korisnika uvijek je više mreže izgrađene u tu svrhu. Suočeni s konkurentskim pritiscima i zamjenom usluga, ne samo da su višeuslužne mreže sljedeće generacije svježi smjer, već su imperativni prolaz kroz koji će se optimizirati ulaganja i rashodi, [1].

Slika 1 prikazuje kako se zapravo, preko iste prijenosne infrastrukture omogućava integracija različitih tipova usluga bez obzira na prijenosni medij.



Slika 1. Paketski bazirana višeuslužna mreža, [2]

Višeuslužne mreže koje su izgrađene na ATM tehnologiji operatori grade za budućnost, a istodobno smanjuju troškove rada za usluge koje pružaju danas. Rješenje temeljeno na ATM tehnologiji osigurava istu kvalitetu usluga kao i kod postojećih mreža koje se temelje na komutaciji kanala, [3].

Prednosti višeuslužnih mreža su sljedeće [4]:

- Smanjeni troškovi za pozive na daljinu – za razliku od tradicionalne telefonije, NGN (eng. *Next Generation Network*) povezuje korisnike putem Interneta. Kada

se koristi IP telefonija, korisnici plaćaju samo promet koji je vrlo povoljan, što NGN čini idealnim rješenjem za sve geografski distribuiranje tvrtke i organizacije s više grana.

- Pouzdanija mreža – NGN nudi visoku pouzdanost sličnu onu telefonskim mrežama (suprotno neostvarenoj kvaliteti internetskih veza) i niske troškove.
- Povećana produktivnost zaposlenika – napredne usluge NGN-a, od uobičajenih interaktivnih telefonskih poziva do internetskih dojavljivača, video konferencija, i sl. omogućuju bržu komunikaciju između zaposlenika tvrtke, partnera i kupaca te učinkovito poboljšavaju korištenje radnog vremena.
- Smanjeni troškovi održavanja infrastrukture – jedinstveni administrator može jednostavno upravljati, fleksibilno prilagoditi i odrediti prioritete prometa, i optimizirati protok pomoću jedinstvenih rješenja i tipičnih shema za povezivanje novih kupaca/usluga i algoritama za otklanjanje poteškoća.

2.2. Arhitektura i razvoj višeslužnih mreža

Početkom 80-ih godina, međunarodna telekomunikacijska unija sektor ITU-T (eng. *International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector*) i ostale standardizacijske organizacije, kao što je ATM forum, uspostavile su niz preporuka za tehnike umrežavanja koje su potrebne za implementaciju inteligentne mreže, za rješavanje ograničenja interoperabilnosti javno integrirane telefonske mreže PSTN (eng. *Public Switched Telephone Network*) te donošenja novih usluga kao što je digitalni zvuk i podatci.

Mreža je dobila naziv B-ISDN (eng. *Broadband Integrated Services Digital Network*). Nekoliko osnovnih standarda razvijeno je kako bi zadovoljilo specifikacije B-ISDN-a, uključujući SONET (eng. *Synchronous Optical Network*) sinkronu optičku mrežu i SDH (eng. *Synchronous Digital Hierarchy*) sinkroniziranu digitalnu hijerarhiju kao standard za prijenos podataka i multipleksiranje te ATM kao standard za prebacivanje. Specifikacije za ATM su bile dostupne proizvođačima do sredine 90-tih, [6].

ATM nije u početku bio dizajniran za IP (eng. *Internet Protocol*), već je bio dizajniran kao višenamjenska, višeslužna, QoS – svjesna komunikacijska platforma. To je prvenstveno namijenjeno usklađivanju velikih glasovnih mreža, H.320 video mreža i velikih količina usluga u području iznajmljenih, sinkronih, podatkovnih usluga.

ATM sustav je izgrađen na inteligenciji u prekidačima i mrežama. Nasuprot tome, proizvodi temeljeni na IP-u temelje se na inteligenciji u jezgri i inteligenciji koja se distribuira na rubove mreža, prvenstveno u računalima krajnjih korisnika koji primaju ili šalju podatke po volji, [6].

Motivacijski razlozi za arhitekturu višeslužnih mreža prema, [5] su:

- Podrška za različite vrste kupaca, tržišta i usluga: stambene, maloprodajne, poslovne, veleprodajne, fiksne, mobilne, *cloud*/virtualizirane usluge preko zajedničke mreže arhitektura.

- Pojednostavljenje mrežne arhitekture: *end-to-end* arhitektura temeljena na IP/MPLS i Ethernet s dobro definiranim migracijskim putem.
- Podrška za pristup multi tehnologije: xDSL (eng. *Digital Subscriber Line*), Ethernet, xPON (eng. *Passive Optical Network*), bežični mikrovalovi, pristup valnoj duljini za poslovne korisnike, TDM (eng. *Time Division Multiplexing*) sklopovi.
- Multi-edge podrška: mogućnost izvora prometa na određenog pretplatnika od strane više, različitih, servisnih rubova.
- Poboljšana skalabilnost: približavanje IP Edge čvorova klijentima omogućava povezivanje više korisnika na agregaciju mreža.
- Poboljšana dostupnost: korištenje OAM-a (eng. *Operations and Maintenance*) i odgovarajuće upravljačke ravnine za automatsku zaštitu i/ili obnovu.
- Bešavna povezanost: integracija pristupa, agregacija i jezgrene mreže.
- Operativna poboljšanja: migracija na mrežu pristupa i agregacija temeljena na konvergiranoj paketnoj mreži može poboljšati proces pripreme *end-to-end* minimiziranjem točaka opskrbe.
- FMC (eng. *Fixed Mobile Convergence*): omogućuje korisniku korištenje jednog uređaja za fiksni i mobilni pristup.

2.1.1. OSI model

OSI (eng. *Open System Interconnection Basic Reference Model*) referentni model je apstraktni, slojeviti model koji služi kao preporuka stručnjacima za razvoj računalnih mreža i protokola. OSI model je podijeljen u sedam slojeva. Svaki sloj daje opis skupa povezanih funkcija koje omogućuju jedan dio računalne komunikacije. Svih sedam slojeva skupa, prikazuju tok podataka od izvora prema odredištu. OSI model je pružio proizvođačima skup standarda koji osiguravaju veću kompatibilnost i među funkcionalnost između različitih mrežnih tehnologija koje su stvorene od velikog broja kompanija diljem svijeta. Unatoč tome što postoje i drugi modeli, većina proizvođača mrežne opreme danas se referira upravo prema OSI referentnom modelu, posebice kada žele educirati svoje korisnike na opreme koju nude, [7].

OSI referentni model je bio razvijen početkom 1983. godine te je bio izvorno namijenjen detaljnoj specifikaciji stvarnih sučelja. Umjesto toga, ISO odbor je odlučio uspostaviti zajednički referentni model za koji drugi tada mogu razviti detaljna sučelja, što bi moglo postati standard. OSI je službeno usvojen kao međunarodni standard od strane ISO (eng. *International Organization for Standardization*) međunarodne organizacije za standardizaciju, [7].

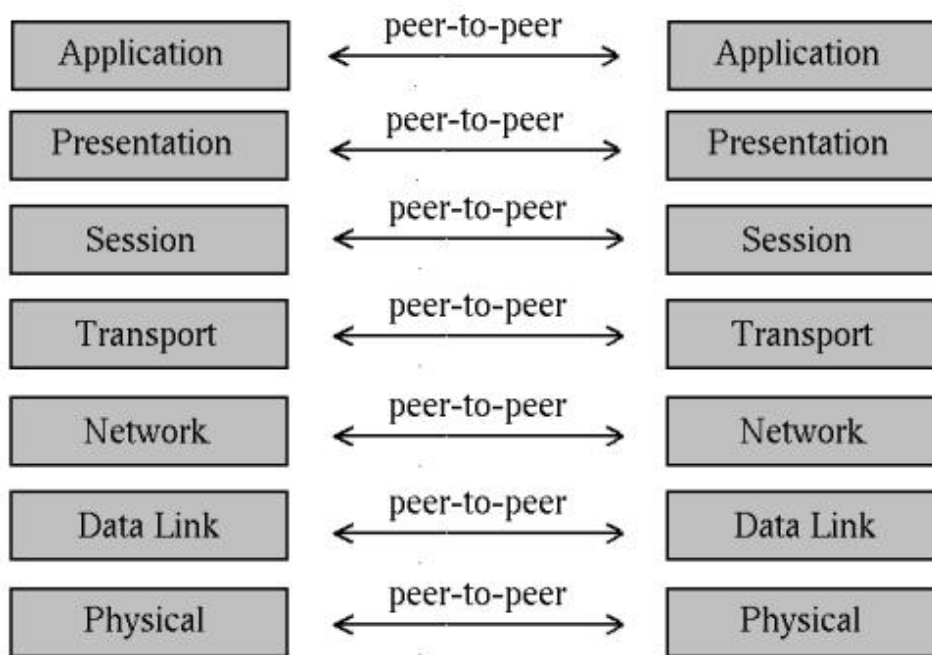
Osnovni koncept OSI referentnog modela je da se proces komunikacije između dvije krajnje točke u telekomunikacijskoj mreži može podijeliti u sedam različitih skupina srodnih funkcija ili slojeva. Svaki komunikacijski korisnik ili program se nalazi na računalu koji može pružiti tih sedam slojeva funkcije. Tako će u određenoj poruci između korisnika biti protok podataka kroz slojeve na izvornom računalu, preko mreže, a zatim preko slojeva na primateljskom računalu. Sedam slojeva funkcije osigurano je kombinacijom aplikacija,

operativnih sustava, mrežnih kartica i mrežnih hardvera koji omogućuju sustavu da stavlja signal na mrežni kabel ili preko Wi-Fi (eng. *Wireless Fidelity*) mreže ili preko drugog bežičnog protokola, [7].

Slojevi OSI modela su:

1. Fizički sloj
2. Podatkovni sloj
3. Mrežni sloj
4. Transportni sloj
5. Sloj sesije
6. Prezentacijski sloj
7. Aplikacijski sloj

Svaki sloj modela komunicira samo s prvim slojem iznad i prvim slojem ispod sebe. Gornji protokol ovisi o funkcionalnosti koji pruža protokol ispod njega. Ako se komunikacija prikaže s dva OSI modela može se vidjeti da se slojevi jednog modela povezuju samo sa slojevima istog nivoa drugog modela. Kao primjer se može uzeti transportni sloj jednog modela koji šalje sve podatke transportnom sloju drugog modela. To se naziva *peer-to-peer* komunikacija (slika 2). Svaki od modela u osnovi predstavlja jedan komunikacijski uređaj, [8].



Slika 2. Prikaz međusobnog povezivanja slojeva dva OSI modela, [8]

OSI model je razvijen kao preporuka koja olakšava razvoj protokola i komunikacije. Podjelom na slojeve je omogućeno da se ubrza razvoj protokola za pojedini sloj, ne oviseći pritom u velikoj mjeri o brzini razvoja protokola na drugim slojevima. Isto tako, cijeli je zadatak segmentiran te je više organizacija, tj. timova moglo raditi na rješavanju pojedinog problema. Na svakom pojedinom sloju može djelovati više različitih protokola, [8].

Odvajanje slojeva kod OSI modela se naziva uslojavanje modela komuniciranja (eng. *layering*). Odvajanjem mreže u sedam slojeva, dobivaju se sljedeće pogodnosti, [9]:

1. Mrežna komunikacija svedena je na manje, puno jednostavnije segmente.
2. Standardizacija mrežnih komponenti, omogućen je razvoj od strane više proizvođača.
3. Mogućnost komunikacije različitih tipova mrežnog hardvera i softvera.
4. Promjena na jednom sloju ne utječe na druge slojeve, što ne utječe na razvoj pojedinog sloja koji može biti puno brži.
5. Mrežna komunikacija je svedena na manje komponente što pojednostavljuje učenje o mrežama.

Fizički sloj je zadužen za prijenos podataka, bit po bit, preko fizičkog medija što ujedno daje do znanja da na ovom sloju ne postoje jedinice podataka, niti zaglavlja. Za što točniji prijenos podataka se koristi različita modulacija za svaki fizički medij. Kod bakrenih medija bitovi se prenose kao nizovi različitih naponskih signala ili kao promjene naponskih razina, dok se kod optičkih medija prenose nizovi impulsa *ima svijetla/ nema svijetla*. Zadaća protokola na ovom sloju nije detekcija i korekcija pogrešaka, već je to prepušteno protokolima viših slojeva. Na prvoj razini OSI modela prikazan je način na koji su računala fizički spojena u mrežu, [9].

Podatkovni sloj ima funkciju pružanja usluga mrežnom sloju. Ovisno o prijenosnom mediju razlikuju se protokoli na serijskim linijama i lokalnim mrežama.

Mrežni sloj ima zadatak prijenosa paketa između krajnjih stanica. Mrežni sloj je najniži sloj koji se brine za prijenos podataka sa kraja na kraj mreže. Zadatak mrežnog sloja je da omogući uspostavljanje, održavanje i raskid veza. Najvažnija funkcija mrežnog sloja je usmjeravanje koje obavljaju usmjernici (eng. *routeri*). Mrežni sloj isto tako ima za zadatak voditi brigu kako ne bi došlo do zagušenja koje se javlja kad je dolazni promet veći od kapaciteta izlaznih linija, pa je u podmreži¹ previše paketa i neki se počinju gubiti. Sučelje (eng. *interface*) između transportnog i mrežnog sloja predstavlja granicu podmreže i mora biti posebno dobro definirano, [9].

Transportni sloj OSI modela obavlja niz funkcija, samim time i nekoliko razina prepoznavanja grešaka, ponovne uspostave rada nakon ispadanja sustava, upravljanje prividnim krugovima i multipleksiranje. On je granica između viših slojeva koji su korisnički orijentirani i nižih slojeva koji su komunikacijski orijentirani. Neke od funkcija koje transportni sloj može obavljati su, [9]:

1. Na najvišoj razini može otkriti i ispraviti greške.
2. Identificirati skupove podataka koji su poslani u ispravnom redoslijedu.
3. Skupove podataka koji su pristigli krivim redoslijedom presložiti u ispravan poredak.
4. Podržava jednoznačan i pouzdan prijenos između dva krajnja čvora na komunikacijskoj mreži.
5. Regulira tok informacije nadziranjem protoka poruka.

¹ Podmreža – podmreža predstavlja manju mrežu unutar neke veće

Sloj sesije je sloj koji kao osnovni zadatak ima upravljanje sesijom. On ima mogućnost raskida sesije te isto tako nadzire ispravan završetak sesije. Komunikacija korisnika sa slojem sesije je izravna. Sloj sesije može provjeriti lozinku korisnika prilikom njezinog unosa i omogućiti prebacivanje iz dvosmjernog načina prijenosa u istovremeni dvosmjerni način rada. Neke od funkcija koje sloj sesije obavlja su sljedeće, [9]:

1. Sinkronizacija i upravljanje dijalozima između korisničkih entiteta koji se izvode na različitim čvorovima komunikacijske mreže.
2. Osiguranje usluge potrebne podršci i održavanju sjednica između dva ili više korisničkih entiteta.
3. Može odrediti tko komunicira, koliko često i koliko dugo.
4. Nadzire prijenos podataka.
5. Sudjeluje u ponovnoj uspostavi rada sustava nakon ispadanja.
6. Može nadzirati korištenje sustava i kreirati informaciju o troškovima koje su napravili pojedini korisnici mreže.

Prezentacijski sloj se brine o sigurnosti rada mreže, prijenosu datoteka i funkcijama formatiranja podataka. On je namijenjen prevladavanju razlika u predočavanju informacija unutar različitih korisničkih entiteta. Omogućava komunikaciju između korisničkih entiteta koji se izvode na različitim računalima i/ili su implementirani pomoću različitih programskih jezika. Prezentacijski sloj je zadužen za transformiranje, formatiranje, strukturiranje, šifriranje i komprimiranje podataka. Pretvara podatke iz standardiziranog formata na mreži u format specifičan za čvor i obrnuto. Samim time omogućava povezivanje uređaja koji koriste različite podatkovne formate.

Aplikacijski sloj je sloj koji je najbliži krajnjem korisniku, što znači da je aplikacijski sloj i korisnik imaju direktno međudjelovanje sa softverskom aplikacijom. Aplikacijski sloj je ujedno i najviši sloj definiran u OSI modelu. Ovaj sloj pruža sve usluge koje se mogu izravno uključiti u korisničke programe kao što su, [9]:

1. Prijenos poruka.
2. Prijenos i pristup datotekama.
3. Komuniciranje s terminalima.
4. Upravljanje mrežom i pristup direktorijima.

Aplikacijski sloj ne pruža usluge krajnjem korisniku, već korisnik mora zatražiti aplikaciju da bi se sami prijenos podataka izvršio.

Protokoli međusobno komuniciraju razmjenjivanjem podataka i kontrolnih informacija. Enkapsulacija započinje u transportnom sloju u kojem se podaci najprije enkapsuliraju te nose naziv segment. Potom se segment spušta do mrežnog sloja gdje dobiva zaglavlje tog sloja te zajedno s podacima čini paket. Paket isto tako dobiva zaglavlje u podatkovnom sloju te skupa čine okvir i definiraju način transporta kroz mrežno sučelje, gdje se u fizičkom sloju podatci konvertiraju u oblik koji je pogodan za prijenos ovisno o prijenosnom mediju. Podatci se de-enkapsuliraju kada stignu na odredište, tako što se proslijeđuju svakom sloju te im se uklanjaju zaglavlja toga sloja kako bi dobili oblik podataka u kojem su poslani, [10].

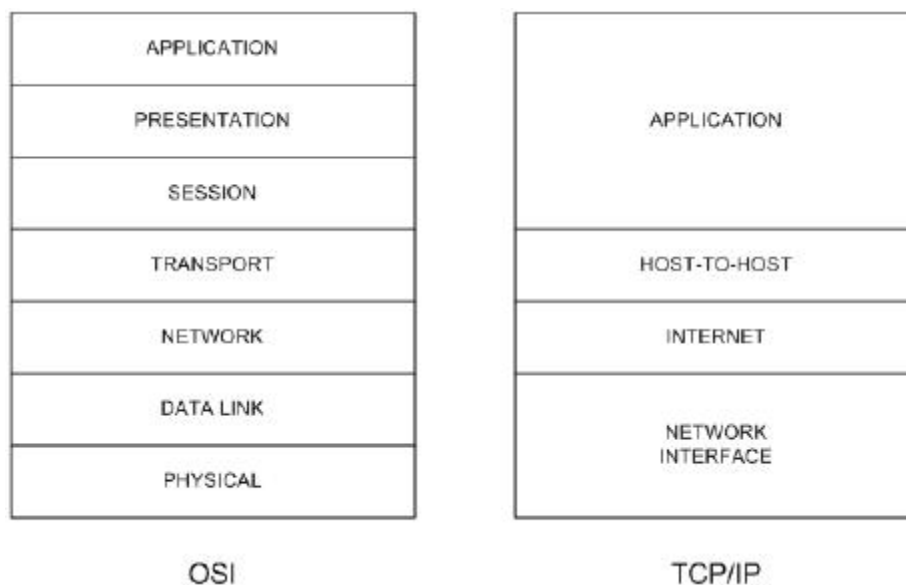
2.1.2. TCP/IP model

Postoje i drugi modeli koji služe kao orijentir u razvoju mrežnih komunikacija. Jedan od njih je i TCP/IP model. Agencija za napredne istraživačke projekte obrane, istraživačka grana američkog ministarstva obrane, 1970-ih je stvorila TCP/IP model za uporabu u ARPANET-u (eng. *Advanced Research Projects Agency Network*), mreži širokog područja koja je prethodila internetu. TCP/IP je izvorno dizajniran za Unix operativni sustav, a ugrađen je u sve operacijske sustave koji su dolazili nakon njega.

TCP/IP je paket komunikacijskih protokola koji se koriste za međusobno povezivanje mrežnih uređaja na internetu. TCP/IP se također može koristiti i kao komunikacijski protokol u privatnoj mreži. Cijeli paket internetskih protokola, skup pravila i postupaka, se obično naziva TCP/IP, iako su i drugi protokoli uključeni u paket. TCP/IP specificira način razmjene podataka putem interneta pružajući komunikaciju od kraja do kraja koja identificira kako bi trebalo pakete adresirati, prenijeti, usmjeravati i primati na odredištu. TCP/IP zahtijeva malo središnje upravljanje i osmišljen je kako bi mreže bile pouzdane, s mogućnosti automatskog oporavka od neuspjeha bilo kojeg uređaja na mreži, [11].

Dva glavna protokola služe određenim funkcijama. TCP definira kako aplikacije mogu stvoriti kanale komunikacije preko mreže. Također upravlja time kako se poruka sastavlja u manje pakete prije nego što se oni prenose preko interneta i ponovno se sastavljaju u pravom redoslijedu na odredišnoj adresi. IP definira kako adresirati i usmjeravati svaki paket kako bi se osiguralo da dosegne pravo odredište. Svaki računalni pristupnik na mreži provjerava tu IP adresu kako bi odredio gdje se proslijeđuje poruka.

TCP/IP koristi model klijent-poslužitelj komunikacije u kojem poslužitelj pruža uslugu (kao što je slanje web stranice) drugom računalu, tj. klijentu u mreži. TCP/IP skup protokola je definiran na način da se svaki zahtjev klijenta smatra novim jer nije povezan s prethodnim zahtjevima. TCP/IP model (slika 3) se malo razlikuje od OSI modela umrežavanja otvorenih sustava koji ima 7 slojeva, što određuje kako aplikacije mogu komunicirati preko mreže, [11].



Slika 3. Prikaz OSI i TCP/IP modela, [12]

TCP/IP funkcionalnost je podijeljena u četiri sloja, od kojih svaki uključuje specifične protokole, [11]:

1. Fizički sloj.
2. Mrežni sloj.
3. Transportni sloj.
4. Aplikacijski sloj.

Fizički sloj se sastoji od protokola koji djeluju samo na vezi – mrežna komponenta koja povezuje čvorove ili domaćine u mreži. Protokoli u ovom sloju uključuju Ethernet za lokalne mreže LAN (eng. *Local Area Network*) i ARP (eng. *Address Resolution Protocol*).

Mrežni sloj, koji se naziva i internetski sloj, se bavi paketima i povezuje neovisne mreže za prijenos paketa preko mrežnih granica. Protokoli mrežnog sloja su IP i ICMP (eng. *Internet Protocol Control Message Protocol*), koji se koristi za izvještavanje o pogreškama.

Transportni sloj je odgovoran za održavanje komunikacije sa krajnjim korisnikom preko mreže. TCP upravlja komunikacijom između *hostova* i osigurava kontrolu protoka, multipleksiranje i pouzdanost. Transportni protokoli uključuju TCP i UDP (eng. *User Datagram Protocol*) koji se ponekad koristi umjesto TCP-a za posebne namjene.

Aplikacijski sloj pruža aplikacije sa standardnom razmjenom podataka. Njegovi protokoli obuhvaćaju HTTP (eng. *HyperText Transfer Protocol*) protokol za prijenos hiperteksta, FTP (eng. *File Transfer Protocol*), POP3 (eng. *Post Office Protocol*), SMTP (eng. *Simple Message Transfer Protocol*) i SNMP (eng. *Simple Network Management Protocol*).

TCP/IP je kompatibilan sa svim operativnim sustavima i svim vrstama računalnih hardvera i mreža, tako da može komunicirati s bilo kojim drugim sustavom. TCP/IP je vrlo skalabilan i kao takav protokol može odrediti najučinkovitiji put kroz mrežu, [11].

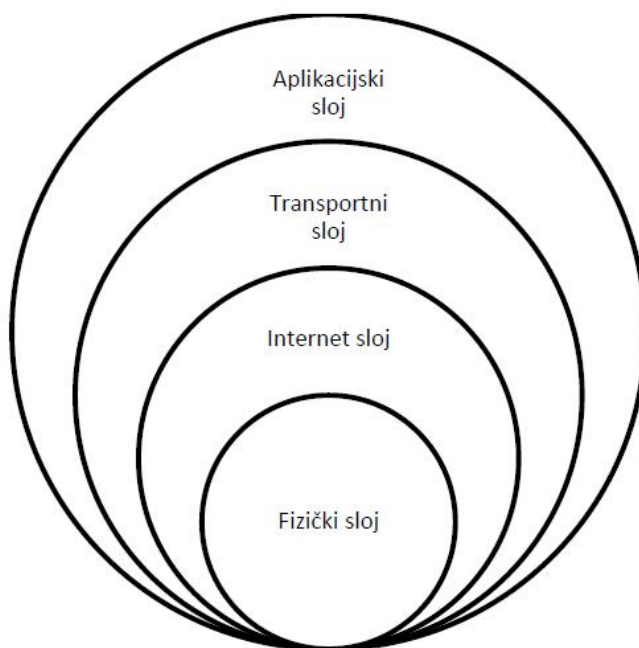
3.ULOGA KOMUTACIJSKOG ČVORA VIŠEUSLUŽNE MREŽE

Usmjeravanje ili komutacija (eng. *switching*) je operacija kojom se informacijska jedinica usmjerava s jedne mrežne grane na drugu, i provodi se unutar mrežnog čvora. Samim time čvorovi u mreži se vrlo često nazivaju i komutacijski čvorovi. Komutacijski čvor se sastoji od određenog broja predajnika i prijemnika, te je potrebno osigurati mogućnost spajanja bilo koja dva para predajnika i prijemnika, [13].

Uloga komutacijskog čvora dolazi do izražaja u višeuslužnim mrežama s obzirom na to da izravno utječu na performanse mreže. Dodjela kapaciteta pojedinim aplikacijama je jako važna funkcija koju obavlja mrežni čvor.

3.1. Mrežni čvor

Mrežni čvor je podijeljen na četiri sloja (slika 4). Samim time Internet mreža je postala sustav čija vertikalna arhitektura ima četiri sloja. Na najnižoj razini je fizički sloj, odnosno sloj fizičkog prijenosa podataka, koji se sastoji od hardvera i softvera koji zajedno ostvaruju fizički prijenos sadržaja između čvorova. Hardver obuhvaća sve fizičke elemente mreže, kao npr. mrežnu karticu, čijim radom upravlja softver koji se izvodi na čvoru kojeg mrežna kartica vezuje na mrežu. Za sami prijenos podataka neizostavni su i nosioci podataka koju povezuju čvorove, odnosno njihove mrežne kartice. Nosioci su bakrene žice, optička vlakna i elektromagnetski valovi kod bežične komunikacije, [23].



Slika 4. Slojevi na kojima mrežni čvor obavlja funkcije, [23]

Čvor Internet mreže predaje svoje IP pakete fizičkom sloju ispod sebe tako da on prenosi svaki paket na onaj susjedni čvor na kojeg mu je to zadano. Procesi fizičkog prijenosa izvode prijenos paketa od čvora do čvora, počevši od izvora sve do konačnog odredišta paketa.

Postoje razni sustavi za pružanje usluge fizičkog prijenosa danih nizova bitova kao što su IP paketi na zadanu fizičku adresu čvora. Ono što obuhvaća sloj fizičkog prijenosa u Internet modelu računalne mreže kod OSI modela spada u fizički sloj i sloj veze podataka, [23].

Internet sloj po svojstvima i funkcijama koje obavlja odgovara mrežnom sloju u OSI modelu i može se ujedno smatrati i glavnim elementom računalne mreže. IP protokol je središnji element Internet mreže, na razini modela i na razini njegove realizacije kao računalne mreže. IP protokol definira strukturu paketa podataka koji se prenose mrežom, adresni prostor u kojem se kreću paketi, i način prosljeđivanja paketa od izvora do odredišta. Zadaća Internet sloja je da prosljeđuje IP paket od izvora do odredišta, što je ujedno i glavni zadatak mrežnog sloja u OSI modelu prema tome ovaj sloj se isto tako može nazvati i mrežnim slojem u računalnoj mreži Internet.

Transportni sloj je ujedno i treći sloj koji upravlja prijenosom. Ovaj sloj sadrži dva protokola, a to su TCP i UDP. Glavna karakteristika ovih protokola je uspostavljanje komunikacije, tj. jednog prijenosnog kanala preko kojeg se ta komunikacija odvija. Na temelju uspostavljene komunikacije, krajnji čvorovi upravljaju tokom podataka tim kanalom, za potrebe aplikacije koja je tražila uspostavu tog prijenosnog kanala [23]. TCP protokol garantira pouzdanu isporuku podataka od izvorišta do odredišta u kontroliranom redoslijedu, odnosno kod nastanka greške u prijenosu ne potvrđuje primitak onih paketa čiji su sadržaji iskrivljeni ili izgubljeni u procesu prijenosa. Samim time zahtijeva od istovrsnog entiteta na domaćinu pošiljatelja da pokrene ponovno slanje tih paketa. Segmenti se pakiraju u IP pakete i šalju preko mreže, [24].

Kod primjene UDP protokola, prijenos nije pouzdan i on se koristi kod onih prijenosa gdje je brzina prijenosa važnija od potpune točnosti. Najčešće je slučaj kod video sadržaja, pogotovo onih čiji se događaji izravno prenose, gdje ispravljanje grešaka nema smisla jer se događaj odvija dalje. Sam proces prijenosa IP paketa, u oba slučaja, se odvija jednako, ali TCP ispravlja greške koje nastaju na tim razinama, dok kod UDP-a to nije slučaj, [23].

Aplikacijski sloj se sastoji od brojnih softverskih sustava, aplikacija i usluga, koje korisnicima pružaju razne mogućnosti rada s računalnom mrežom. Protokoli koji su najpoznatiji kod aplikacijskog sloja su HTTP i SMTP. Glavna zadaća HTTP protokola je definiranje rada *web* sustava, dok SMTP ima zadatak definirati rad sustava računalne pošte, [23].

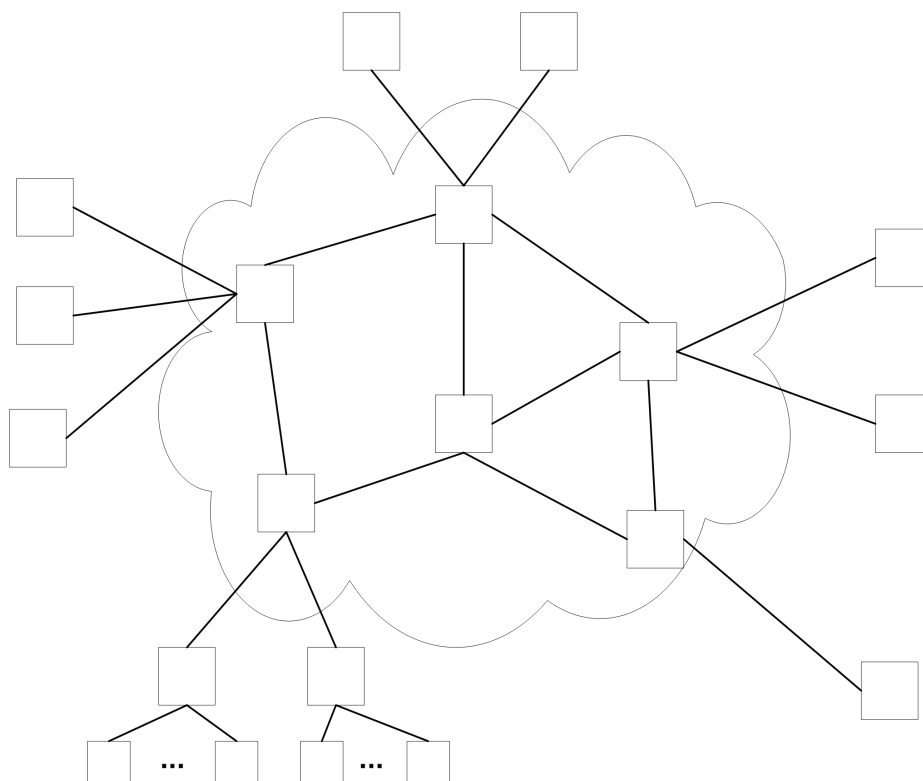
3.2.Funkcija mrežnog čvora

Čvorovi mreže su zapravo računala koja su uključena u mrežu, i dijele se na dvije osnovne vrste:

1. Čvorovi koji ostvaruju usluge prijenosa i
2. Čvorove koji koriste usluge prijenosa.

Računala na kojima rade serveri i na koje se izravno povezuju korisnici, nazivaju se domaćinima (*hosts*). Domaćine međusobno povezuje sustav čvorova i veza, koji ostvaruje prijenos sadržaja, tj. podataka između domaćina. Čvorovi, čija je primarna namjena da

ostvaruju prijenos podataka u mreži nazivaju se prijenosnim čvorovima, tj. prijenosnicima. Slika 5 prikazuje osnovnu strukturu mrežnog sustava koji sadrže domaćine i prijenosnike, [25].



Slika 5. Domaćini i prijenosnici, [25]

Mreža se općenito označava simbolom oblaka, te je na slici 5 oblakom obuhvaćena samo tzv. „unutrašnjost mreže“ zato da se istakne razlika u ulogama računala koja ostvaruju prijenos od uloge računala koja koriste usluge prijenosa i s kojima izravno rade korisnici. Čvorovi mreže unutar oblaka nazivaju se prijenosnici, a čvorovi izvan oblaka su domaćini. Naziv „prijenosnik“ je uveden jer nedostaje zajednički naziv za sve uređaje koje izvode „usmjeravanje i prijenos jedinica podataka“ u mrežnim sustavima, bez obzira na vrstu jedinica i razinu prijenosa, [25].

U prijenosnike spadaju još i usmjerivači (*routers*), vrata (*gateways*), preklopnici (*switches*) i mostovi (*bridges*). Na prethodno prikazanoj slici se nalaze usmjerivači koji usmjeravaju i prenose sadržaje i/ili uspostavljaju putove kroz mrežu, ovisno od načina rada dane mreže. Zadaća prijenosnika je da izvode prijenos sadržaja između domaćina. Sustav prijenosnika ostvaruje prijenos, dok domaćini koriste prijenos. Rad aplikacija iziskuje usluge prijenosa podataka, ali aplikacije se ne rade na prijenosnicima, niti se nalaze na njima, [25].

Postoje dva osnovna načela komutiranja informacijskih jedinica kroz informacijsku mrežu, a to su komutacija kanala i komutacija paketa.

1. Komutacija kanala
2. Komutacija paketa

3.3.Komutacija kanala

Kanal, tj. spojni put se uspostavlja preko odgovarajućih komutacijskih sustava, na osnovu komutacijske informacije. Za svaku vezu je potrebna uspostava i raskid spojnog puta, tj. kanala. Prije je spojni put zahtijevao uspostavu fizičkog spojnog puta s kraja na kraj veze, a danas se između korisnika uspostavlja veza koja traje cijelo vrijeme trajanja poziva. Spojni put koji se uspostavlja ima fiksnu pojasnu širinu, tj. ima na raspolaganju fiksnu brzinu prijenosa informacija kroz cijelo vrijeme trajanja uspostavljene veze. Bez obzira na to je li korisniku potrebna takva pojasna širina ona je rezervirana za njegovu vezu [14].

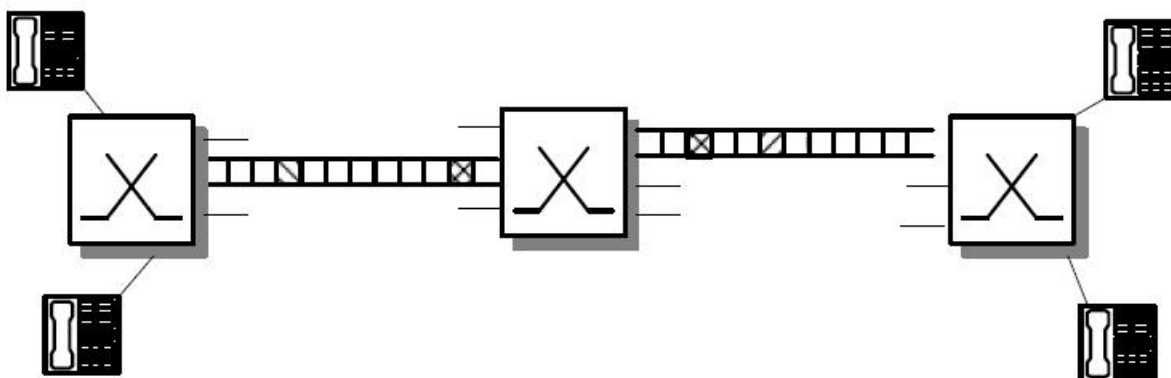
Temeljne prednosti ovakvog pristupa prijenosu i komutiranju informacija su:

1. Malo kašnjenje.
2. Garancija kvalitete usluge.

Temeljni nedostaci komutacije kanala su:

1. Sve veze su iste brzine.
2. Pojasna širina koja je rezervirana za jednu vezu ne može se istovremeno koristiti za drugu vezu.
3. Loša iskoristivost spojnih vodova.

Telekomunikacijske mreže s komutacijom kanala dizajnirane su prvenstveno za osiguranje govorne usluge. Slika 6 prikazuje komutaciju kanala gdje je korisniku dodijeljen kanal pojasne širine 64 kb/s kroz cijelo vrijeme trajanja veze. Komutacijski sustav ima zadatak komutirati kanal sa određenog ulaza na određeni izlaz u skladu s korisničkim zahtjevom, [14].



Slika 6. Prikaz komutacije kanala, [14]

3.4.Komutacija paketa

Korisnička informacija se na ulazu u mrežu dijeli na segmente odgovarajućeg formata. Svakom segmentu se dodaje upravljačka informacija, te se formirani segmenti nazivaju paketi. Svaki paket se sastoji od upravljačkog dijela i korisničkog dijela. Upravljački dio se sastoji od informacije o usmjeravanju, tj. odredištu, informacije potrebne za prijenos paketa te informacije na osnovi koje se segmenti na odredištu spajaju, [14].

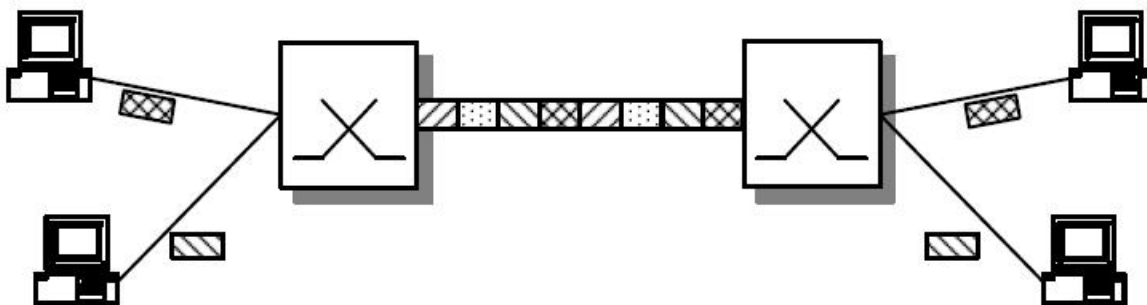
Informacija o odredištu se u komutacijskom sustavu analizira te se paket dalje usmjerava prema sljedećem sustavu ili korisniku. Prijenosni put svih paketa koji se odnose na određenu vezu ne mora biti isti. Svaki paket može putovati različitim putem od puta ostalih paketa prema istom odredištu.

Paketi mogu biti fiksne ili varijabilne duljine ovisno o tome koja se tehnologija koristi za prijenos i komutaciju. Ako su paketi varijabilne duljine onda se definira maksimalna duljina paketa pri komutaciji. Kod ovakvog načina prijenosa i komutacije informacija na raspolaganju je cijela pojasna širina za slanje svih paketa, ovisno o zahtjevanoj kvaliteti usluge.

Prednosti ovakvog načina prijenosa i komutiranja informacija su, [14]:

1. Mogućnost ponovnog slanja paketa u slučaju pogreške.
2. Više korisnika istovremeno može koristiti raspoložive resurse – učinkovita uporaba resursa.
3. Paketi imaju alternativne putove do odredišta.

Osnovni nedostatak prijenosa i komutacije paketa (slika 7) vezan je uz osiguranje odnosno garanciju kvalitete usluge QoS, te se upravo zbog toga primjenjuju razni mehanizmi pomoću kojih se zadovoljava zahtjevana kvaliteta raznih usluga.



Slika 7. Prikaz komutacije paketa, [14]

Moderni elementi mreže sve su zahtjevniji za rješavanje heterogenog prometa. Nedavna djela razmatraju politiku obrade za međuspremnik koji drži pakete s različitim zahtjevima za obradu, ali jedinstvena vrijednost, s ciljem maksimiziranja propusnosti odnosno broja prenesenih paketa. Ostali razvoji se bave paketima različitih vrijednosti, ali svaki paket zahtijeva jednak ciklus prerade. Cilj je maksimizirati ukupno prenesu vrijednost.

Moderne mreže zahtijevaju implementaciju naprednih ekonomskih modela koji se mogu predstaviti željenim ciljevima, mrežnom topologijom i politikom upravljanja. Kod internetske arhitekture je potrebno uzeti u obzir ciljeve kao što su iskorištavanje mreže, propusnost, dobit i dr., [22].

4. ZNAČAJKE METODE PRIORITETNOG POSLUŽIVANJA

Metoda prioritetnog posluživanja se opisuje kao metoda koja je pogodna za ispunjenje zahtjeva interaktivnih aplikacija, kao što su umreženo igranje igara ili prijenos govora Internet protokolom. Pravovremena isporuka paketa ima veliki utjecaj na performanse takvih aplikacija, jer se smanjuje mogućnost gubitka paketa te se samim time smanjuje vrijeme čekanja paketa na raspoloživi kapacitet odlaznog prometnog kanala.

U suvremenom računalnom i telekomunikacijskom sustavu paketi se mogu grupirati u klase prema QoS zahtjevima. Disciplina raspoređivanja paketa je alat koji se može koristiti za postizanje diferencijacije usluga kako bi se osigurala kvaliteta usluge za tokove u mreži. Takva se disciplina može provesti u prekidačima ili usmjerivačima mreže kako bi se prilagodili različitim zahtjevima širine pojasa dolaznih tokova koji dijele istu vezu.

Kod upravljanja redovima čekanja nastoji se ublažiti zagušenje mreže i to ako je potrebno i odbacivanjem paketa. Ako se dogodi da se u prijenosu pojave paketi koji su uslijed kašnjenja postali neupotrebljivi (npr. prijenos slike, zvuka) oni se odbacuju u svrhu oslobađanja kapaciteta s obzirom na to da će ih primatelj podataka ionako odbaciti. Algoritam raspoređivanja određuje koji će paket biti sljedeći poslan kako bi se održao i poštovao prioritet raspoređivanja raspoloživih kapaciteta.

Upravljanje redovima čekanja je isto tako dio QoS koji se odnosi na garanciju određene propusnosti veze. Tok podataka se identificira i klasificira te se potom smješta u red čekanja koji jamči odgovarajući nivo usluge prijenosa podataka. Kod svake discipline posluživanja bitno je specificirati pravila za donošenje odluke koji paket odabrati na posluživanje odmah nakon što poslužitelj prihvati sljedeću jedinicu, te treba li prekinuti ili nastaviti posluživanje jedinice koje se poslužuje. Odluka može biti uvjetovana izvana, tj. ovisiti samo o prioritetu klase kojoj paketa pripada te je tada riječ o PQ disciplini posluživanja s prioritetom, [28].

4.1. Metode dodjele pristupa prometnim tokovima

Dolazni paketi su odvojeni u skupine prema svojim prioritetima. Paketi jednog prioriteta zakazani su za posluživanje samo ako su redovi višeg prioriteta prazni. Paketi su smješteni u odgovarajuće redove koji se temelje na atributima paketa. Kada god je odlazna veza slobodna i postoji mogućnost slanja paketa, uvijek se prvo gleda na red s većim prioritetom, a ako nema slobodnog mjesta onda se paket uklanja iz reda. Jedino ako je visoki red čekanja prazan, onda se poslužuje red s nižim prioritetom. Prioritetno posluživanje je bezuvjetno, jer ako stigne paket visokog prioriteta dok se paket s niskim prioritetom šalje, isti se ne prekida. No, kada se završi prijenos paketa s niskim prioritetom, najprije se provjeravaju redovi s visokim prioritetom. Iako je u radu fokus na PQ, u nastavku će biti opisane i ostale metode, kako bi se vidjeli prednosti i nedostaci pojedinih metoda. Prioritetno posluživanje može dovesti do „izgladnjivanja“ prometa s niskim prioritetom, ali samo ako promet visokog prioriteta zauzima 100% izlazne širine pojasa.

Neke od metoda posluživanja, tj. dodjele pristupa prometnim tokovima su:

1. PQ (eng. *Priority Queue*).

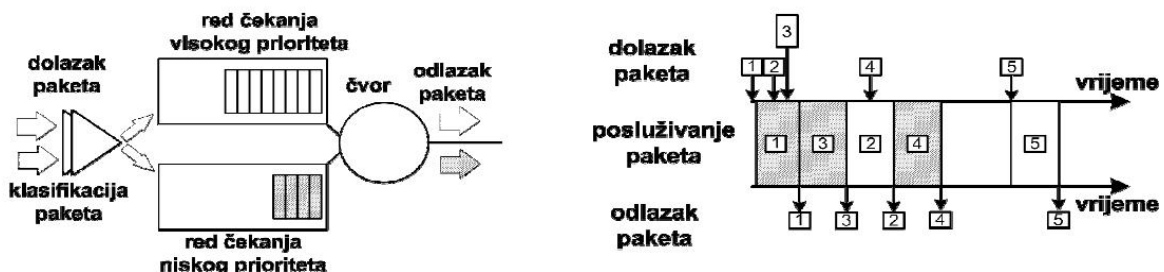
2. RR (eng. *Round Robin*).
3. FCFS (eng. *First Come First Served*).
4. WFQ (eng. *Weighted Fair Queue*).
5. CBWFQ (eng. *Class Based WFQ*).
6. SARR (eng. *Self Adjustment Round Robin*).

4.1.1. PQ

Prioritetno posluživanje je tehnika upravljanja zagušenjima. PQ raspoređuje promet tako da se redovi s većim prioritetom „uvijek“ prvo poslužuju. To može uzrokovati nastanak drugih redova s nižim prioritetom. Prioritetno posluživanje koristi četiri vrste redova, a to su visoki, srednji, normalni i niski.

Ako je visoki red čekanja paketa, po rasporedu će biti najprije posluženi. Ako nema paketa u visokom redu, po rasporedu će biti poslužen srednji red čekanja. Poslužit će se jedan paket iz srednjeg reda, te će opet provjeriti li ima li paketa na čekanju u visokom redu čekanja. Niski red čekanja će biti poslužen jedino ako nema paketa na čekanju u visokom, srednjem i normalnom redu čekanja, [26].

Jedna od četiri vrste redova može se provesti za QoS klasu: realno vrijeme, visoko, srednje i nisko. Paketi u odlaznom protoku prometa su na čekanju na temelju njihovog prioriteta (slika 8) sve dok mreža nije spremna za obradu samih paketa. Paketi višeg prioriteta su osjenčani. Prioritetni red čekanja omogućuje osiguranje važnosti prometa, aplikacije i korisnika. Prioritet u stvarnom vremenu se obično koristi za aplikacije koje su posebno osjetljive na latenciju, kao što su glasovne i video aplikacije, [27].



Slika 8. Prikaz prioritetnog posluživanja, [28]

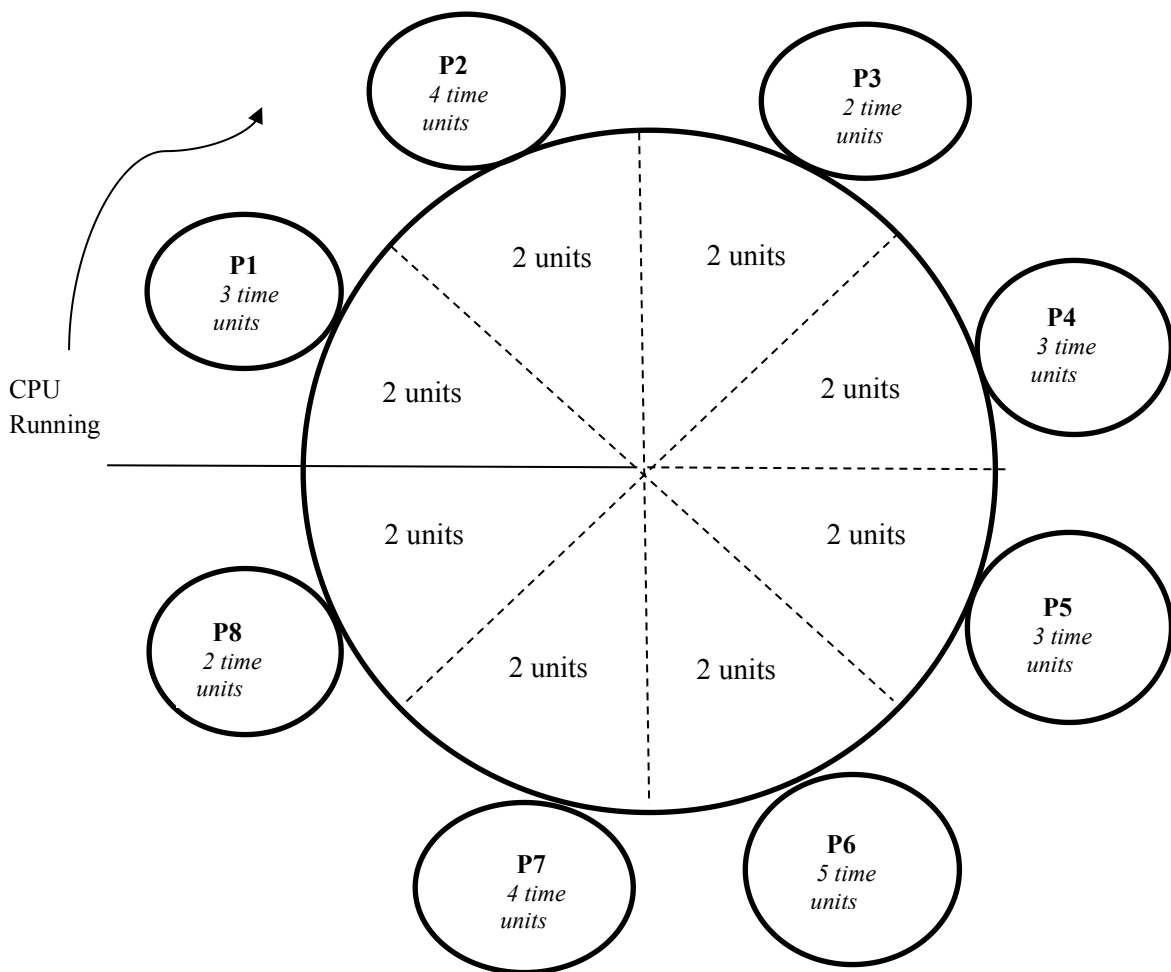
S obzirom na to da kod discipline posluživanja s prioritetom, kada je odluka o odabiru sljedećeg paketa uvjetovana izvana odnosno odabir sljedećeg paketa na posluživanje ovisi samo o prioritetu klase kojoj paket pripada, paket i -te klase ako postoji uvijek će biti uzet na posluživanje prije paketa j -te klase. Ako se paket j -te klase poslužuje, a jedinica i -te klase dolazi na posluživanje mogu postojati različite kombinacije. Jedna od kombinacija je s prekidom, gdje se posluživanje paketa j -te klase prekida i započinje s posluživanjem paketa i -te klase.

Kod ove discipline posluživanja se pojavljuje problem ako je previše paketa sa višim prioritetom jer u tom slučaju paketi s manjim prioritetom uopće nisu posluženi, tj. dolazi do prevelikih kašnjenja, [28].

4.1.2. RR

RR algoritam je algoritam raspoređivanja. U ovom algoritmu se svaki proces smatra jednakim. Vremenski interval za pokretanje poznat kao kvantni se dodjeljuje svakom procesu. Red čekanja održava se s kvantom za svaki proces. Nakon što je proces završio svoj kvantni broj, postavljen je na kraju reda i novi se proces izvodi iz reda čekanja. Algoritam za raspoređivanje se koristi za osobna računala i poslužitelje, [17].

RR algoritam daje bolji odaziv, ali lošiji prosječni rok trajanja procesa i vrijeme čekanja. Algoritam RR je jedan od najstarijih, najjednostavnijih i najčešće korištenih algoritama za raspoređivanje, posebno dizajniran za sustave dijeljenja vremena. Mala jedinica vremena, zvana kvant je definirana. Svi pokrenuti procesi čuvaju se u kružnom redu. Slika 9 daje prikaz RR algoritma, [20].



Slika 9. RR algoritam, [21]

CPU (eng. *Central Processor Unit*) raspoređivač ide oko ovog reda, dodjeljujući CPU za svaki proces za vremenski interval jednog kvanta. Novi procesi se dodaju repu reda. CPU raspoređivač preuzima prvi proces iz reda čekanja, postavlja brojač da prekine nakon jednog kvantnog postupka i otpreme procesa. Ako se proces i dalje izvodi na kraju kvanta, CPU je

ispražnjen i proces je dodaje u rep reda. Ako proces završi prije kraja kvantnog postupka, sam proces samostalno oslobađa CPU.

U oba slučaja, CPU raspoređivač dodjeljuje CPU sljedećem procesu u redosljedu čekanja. Performanse RR algoritma znatno ovise o trajanju kvantnog vremena. U jednom ekstremu, ako je vremenski kvantni izraz iznimno velik, uzrokuje slabo vrijeme odziva i približava se FCFS-u. Ako je vremenski kvantni izraz iznimno mali, to uzrokuje previše kontekstnih prekidača i smanjuje učinkovitost procesora, [20].

4.1.3. FCFS

FCFS algoritam je algoritam raspoređivanja i mehanizam upravljanja mrežnim usmjeravanjem koji automatski izvršava zahtjeve i procese u redovima po redosljedu njihovog dolaska. Kod njega se procesi čuvaju u redu i izvršavaju jedan po jedan. Kad god stignu novi procesi čuvaju se na kraju reda. Kada je proces koji se izvodi blokiran, sljedeći proces u redu je pokrenut i blokirani proces se nalazi na kraju reda. FCFS se obično koristi u serijskim sustavima.

Prednost FCFS algoritma je da je vrlo jednostavan za implementaciju. Nedostatak FCFS algoritma je da, budući da je nepreventivan, korištenje procesora može biti izgubljeno u nekim situacijama. FCFS je poznati i kao FIFO (eng. *First In First Out*) [17]. Slika 10 prikazuje FIFO algoritam raspoređivanja.



Slika 10. FIFO algoritam, [19]

U nastavku će biti naveden primjer kako funkcionira raspoređivanje FCFS procesa, uz pretpostavku da postoje tri procesa u redu: P1, P2 i P3. P1 se nalazi u zapisniku za obradu s vremenom čekanja od nula sekundi i deset sekundi za potpunu obradu. Sljedeći postupak, P2, mora čekati deset sekundi i stavlja se u ciklus prerade sve dok se P1 ne obradi. Pod pretpostavkom da će P2 trajati petnaest sekundi, završni proces, P3, mora čekati 25 sekundi za obradu. FCFS možda nije najbrži algoritam raspoređivanja procesa jer ne provjerava prioritete povezane s procesima. Ti prioriteti mogu ovisiti o pojedinačnim vremenima izvršenja procesa, [18].

4.1.4. WFQ

Razvrstavanje protoka je standardni WFQ tretman, što znači da se paketi s istom izvorišnom IP adresom, odredišnom IP adresom, izvornim TCP ili UDP portom ili odredišnim TCP ili UDP priključkom klasificiraju kao da pripadaju istom toku. WFQ dodjeljuje jednak

udio propusnosti za svaki tok, te se naziva još i pravednim čekanjem jer su svi tokovi jednako ponderirani, [16].

WFQ omogućuje pravilnu distribuciju širine pojasa u skladu s dodijeljenim težinama. Uzima u obzir i veličinu paketa izračunavanjem virtualnog vremena završetka. Rasporedom se dodjeljuje vrijeme završetka u svakom paketu kada stigne u red. Vrijeme odgovara vremenu u kojem će paketi biti poslan u cijelosti, bit po bit iz svakog reda. Broj bitova koji se izračunavaju u jednom redu odgovara dodijeljenoj težini. Paket s najmanjim vremenom završetka odabran je za izlaz. WFQ jamči da svaka klasa dobiva pristup izlaznoj širini pojasa i dijeli ga proporcionalno dodijeljenoj težini, [29].

4.1.5. CBWFQ

CBWFQ je važna disciplina u paketnim mrežama u kojima postoji višestruke vrste prometa, kao što su glas, video i podaci, koje se natječu za iste resurse u mreži. Svaka od ovih vrsta prometa ima svoje specifične zahtjeve u vidu kvalitete usluga koji moraju biti ispunjene. CBWFQ u nekom smislu daje kompromis koji pokušava ispuniti takve zahtjeve. S jedne strane se izbjegava ekstremno izoliranje svake klase prometa na vlastitoj mreži; što je bolje za zadovoljavanje QoS zahtjeva, dok se s druge strane izbjegava ekstremna mogućnost da se sve klase natječu u prvom dolasku.

Ova disciplina se provodi u kombinaciji s prioritetnim redoslijedom redaka kao dio discipline niske latencije čekanja, [15]. CBWFQ proširuje standardnu WFQ funkcionalnost kako bi pružila podršku za korisnički definirane klase prometa. Za CBWFQ se definiraju klase prometa na temelju kriterija podudaranja uključujući protokole, popise kontrole pristupa i ulazna sučelja. Paketi koji zadovoljavaju kriterije podudaranja za klasu predstavljaju promet za tu klasu. Red čekanja je za svaku klasu rezerviran, a promet koji pripada klasi je usmjeren na red za taj razred. Nakon što je klasa definirana prema kriterijima podudaranja, može se dodijeliti.

Da bi se karakterizirao razred, potrebno je dodijeliti širinu pojasa, težinu i maksimalni limit paketa. Pojasna širina dodijeljena klasi je zajamčena pojasna širina koja se isporučuje u klasi tijekom zagušenja. Paketi koji pripadaju klasi podliježu ograničenjima propusnosti i redovima koji karakteriziraju razred. CBWFQ omogućuje određivanje točnog iznosa pojasne širine koji će biti dodijeljen za određenu klasu prometa. Uzimajući u obzir dostupnu pojasnu širinu na sučelju, može se konfigurirati do 64 klasa i kontrolirati distribucija među njima, što nije slučaj sa WFQ protokom, [16].

4.1.6. SARR

Novi algoritam pod nazivom SARR (eng. *Self Adjustment Round Robin*) se temelji na novom pristupu koji se naziva dinamički vremenski kvantni pojam. Ideja ovog pristupa je da se vremenski prilagođava u skladu s vremenom raspršivanja procesa koji se izvode. Na temelju eksperimenata i kalkulacija koje su napravljene, novi modificirani algoritam radikalno rješava fiksni vremenski kvantni problem koji se smatra izazovom za RR algoritam. Korištenje algoritma dinamičkog raspoređivanja povećalo je performanse i stabilnost

operacijskog sustava te podržava izgradnju operativnog sustava samo-adaptacije, što znači da je sustav taj koji će se prilagoditi zahtjevima korisnika, a ne obrnuto. U ovom algoritmu se vremenski kvantni tijek u više navrata prilagođava u skladu s vremenom rasprskavanja sadašnjih procesa, odnosno vrijeme medijskog pucanja se koristi za vremensku kvantnu vrijednost, [30].

4.2. Mreže s prioritarnim posluživanjem

Unatoč većoj pojasnoj širini koja je dostupna korisnicima interneta, problemi s mrežom su i dalje objektivni s obzirom na niz mrežnih aplikacija koje se pokreću. Jednostavnost u kojoj se može konfigurirati dijeljenje interneta, zajedno s povećanjem u broju računala prisutnih u kućanstvima potrošača, povećavaju vjerojatnost da će se konkurentske mrežne aplikacije morati natjecati za pristup ograničenom opsegu pojasne širine. Izvedba aplikacija kao što su mrežne igre i VoIP jako ovisi o kašnjenjima prijenosa i stopama gubitka paketa, što se može poboljšati putem prioritarnog čekanja na uređaju kako bi se smanjio utjecaj kašnjenja u redu čekanja.

Dijeljenje interneta između više računala koji se nalaze na istom mjestu dovodi do usporavanja raspoloživih mrežnih resursa. Uobičajeni primjer bi uključivao korisnika na jednom računalu koji igra online igru dok se drugo računalo koristi za pregledavanje web-a ili prijenos velikih datoteka. Dok aplikacije temeljene na TCP-u mogu koristiti TCP-ove inherentne kontrole zagušenja da dijele propusnost između više istodobnih tokova, aplikacije u stvarnom vremenu postavljaju različite zahtjeve na mrežu. Utjecaj sukoba za propusnost uskog grla utjecat će na ove vrste aplikacija na drugačiji način. Vrlo interaktivne mrežne igre, postavljaju različite zahtjeve na mrežu u usporedbi s tradicionalnim neinteraktivnim aplikacijama. Za ove igre korisnikova sposobnost da uspješno igra uvelike ovisi o QoS kvaliteti usluge koja je prisutna u mreži.

Nedavne studije su pokazale da se s degradirajućim mrežnim uvjetima, kao što su povećanje kašnjenja, *jitter*, gubitak paketa, korisnici igraju manje učinkovito i njihova percipirana kvaliteta igranja značajno se smanjuje. Iako generirani promet ima malu pojasnu širinu, aplikacija je vrlo osjetljiva na vrijeme prijenosa i kašnjenje u redu čekanja. Dok igrači pokazuju smanjenje performansi u nepovoljnim uvjetima mreže, VoIP aplikacije dovode do „razbijenih“ audio struja. Jedan pristup koji se nudi za poboljšanje QoS mreže mrežnim igrima je korištenje prioritarnih redoslijeda kako bi se smanjila kašnjenja čekanja kroz koje igre prolaze. Neki korisnici su predložili, u istraživanju koje je rađeno, sheme za automatsko prepoznavanje igre i drugih osjetljivosti na odgodu i automatsko preoblikovanje CPE uređaja za određivanje prioriteta tih tokova, [31].

5. GENERIRANJE ULAZNOG TOKA ČVORA PAKETNE MREŽE

Vremena dolaska paketa u čvor paketne mreže generirana su slučajnim redoslijedom. Brojevi su generirani u rasponu od 2 ms do 1297 ms, gdje je najranije vrijeme dolaska paketa u čvor 2 ms, a najkasnije 1297 ms. Pri generiranju ulaznog toka čvora paketne mreže uzeti su u obzir osnovni pokazatelji ulaznog toka, kao što su:

1. Razdioba međudolaznih vremena.
2. Količina pristiglih paketa u pojedinoj klasi.
3. Prometno opterećenje.
4. Prosječna duljina paketa.
5. Vrijeme posluživanja.

Slučajnim redoslijedom je generirano ukupno 413 paketa kroz tri različite simulacije, s različitim vremenima dolaska paketa u čvor u rasponu od 2 ms do 1297 ms. Svakom paketu je dodijeljena jedna od tri klase, koje su definirane na temelju duljine paketa koja je također generirana u okviru simulacije. Kroz sve tri simulacije je korišten kapacitet od 1 Mbit/s.

Analiza je provedena u Microsoft Excel alatu, gdje su iz zadanih vrijednosti izračunata vremena posluživanja i čekanja paketa u čvoru za svaki paket koji je pristigao. Izračun je napravljen prema sljedećem izrazu iz, [32]:

$$T_s = \frac{\bar{p}}{C} \cdot 1000 \quad (1)$$

gdje T_s označava vrijeme trajanja posluživanja, \bar{p} označava prosječnu duljinu paketa koja se izražava u bitima, C je oznaka za kapacitet, a množenje sa 1000 označava pretvorbu sekundi u milisekunde. S obzirom na to da je vrijeme pristizanja paketa u čvor bilo poznato, jer je generirano tijekom simulacija, vrijeme završetka posluživanja svakog pojedinog paketa računato je prema sljedećem izrazu iz, [32]:

$$T_z = T_{dp} + T_s \quad (2)$$

gdje T_z označava vrijeme završetka posluživanja, a T_{dp} vrijeme kada je paket došao u čvor. S obzirom na to da su sve tri vrijednosti iz prethodno navedene formule poznate za svaki paket, vrijeme čekanja paketa je izračunato na temelju sljedećeg izraza iz, [32]:

$$T_w = T_z - T_{dp} - T_s \quad (3)$$

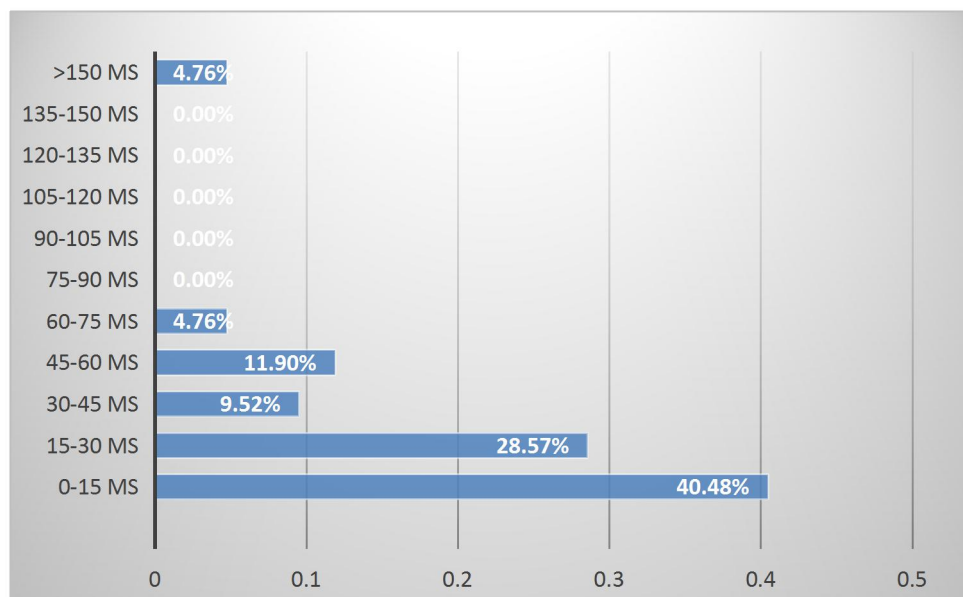
gdje T_w označava vrijeme čekanja paketa izraženo u sekundama, a ostale vrijednosti iz formule su već prethodno opisane.

Izračunata su i prosječna vremena čekanja za svaku pojedinu klasu, te prosječno prometno opterećenje odnosno iskorištenje kanala koje nosi oznaku ρ za zadani kapacitet i popunjenost buffera, tj. međuspremnika izraženu u bitima. ρ je dobiven na temelju sljedećeg izraza, [32]:

$$\rho = \lambda \cdot T_s \quad (4)$$

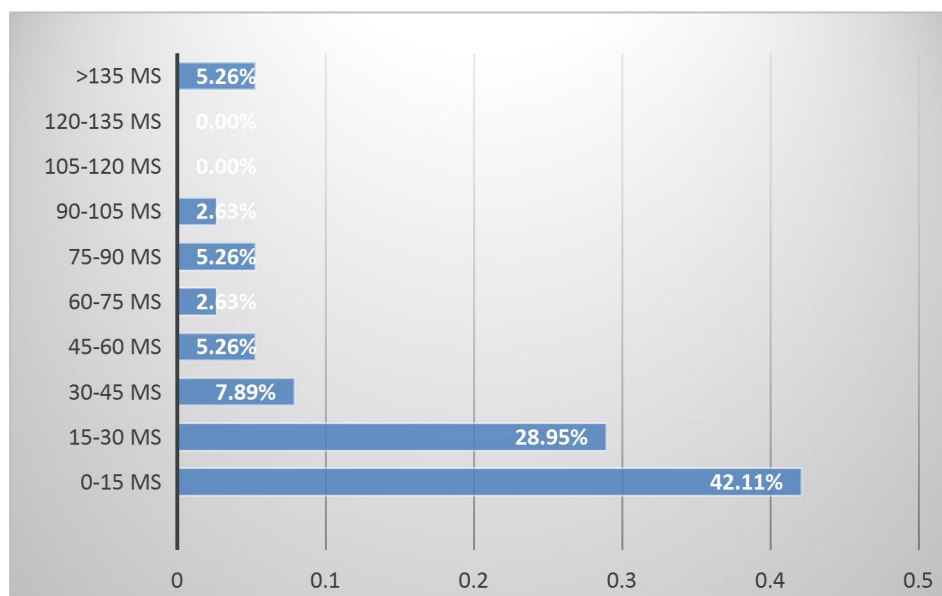
gdje ρ označava prometno opterećenje, λ broj paketa u sekundi, a T_s kao što je već prethodno navedeno vrijeme posluživanja.

Na sljedećim grafovima je prikazana razdioba međudolaznih vremena za sve tri simulacije, za treću klasu koja ima najveću dužinu paketa i najdulje prosječno vrijeme čekanja paketa na posluživanje.



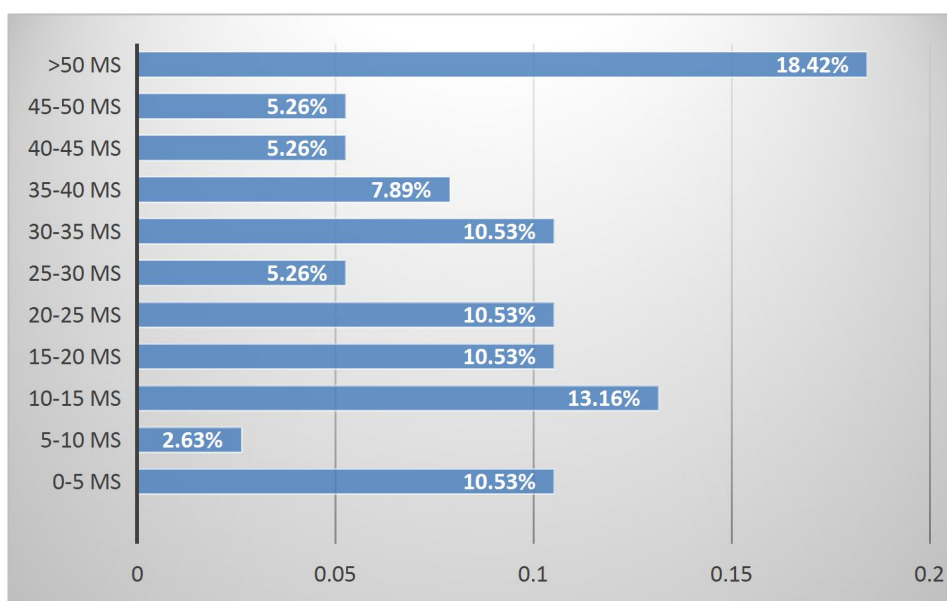
Graf 1. Razdioba međudolaznih vremena kod treće klase u prvoj simulaciji

Ovaj graf prikazuje razdiobu međudolaznih vremena između pojedinih paketa koji pristižu u čvoru. Prikaz se odnosi na treću klasu u prvoj simulaciji. Ovaj graf prikazuje da je vremenski razmak između dolaska dva paketa najčešće trajao od 0-15 ms, čak 40,48%, pa slijedi da u vremenu od 15-30 ms ima 28,57% paketa. Zatim je u vremenu od 30-45 ms pristiglo 9,52% paketa, od 45-60 ms je 11,90%, od 60-75 ms je pristiglo 4,76% paketa. Nadalje, u periodu od 75-150 ms nema pristiglih paketa, te se naposljetku vidi da za vrijednost >150ms ima 4,76% paketa koje je pristiglo u čvor.



Graf 2. Međudolazno vrijeme u određenim intervalima kod treće klase u drugoj simulaciji

Za međudolazno vrijeme kod grafa 2 grafa su uzete vrijednosti od 0-135 ms, te >135 ms. Kao što se može vidjeti u intervalu od 0-15 ms je prikazano 42,11% pristiglih paketa, što je u odnosu na prethodni graf gotovo jednako, s obzirom na to da je razlika 1,63%. U vremenu od 15-30 ms prikazano je 28,95% pristiglih paketa, te je u odnosu na prethodni graf razlika zanemariva jer se radi o 0,38%. Kako odmičemo prema većim intervalima, broj paketa u njima je sve manji. Jedina razlika kod ovog grafa u odnosu na prethodni je što u intervalu od 75-105 ms i u intervalu >135 ms ima paketa koji pristižu u čvor u tom međudolaznom vremenu.



Graf 3. Međudolazno vrijeme u određenim intervalima kod treće klase u trećoj simulaciji

Kod treće klase u trećoj simulaciji može se primijetiti da raspon koji je uzet za međudolazna vremena nije toliko veliki u odnosu na prethodna dva grafa, s obzirom na to da je najveće međudolazno vrijeme u ovoj klasi 77 ms. Ova klasa ima najveće vrijeme čekanja paketa na posluživanje u odnosu na treću klasu u prethodne dvije simulacije, te istovremeno i najveće prometno opterećenje. Može se primijetiti da u svakom intervalu ima paketa koji dolaze u čvor, no ipak najveći broj njih pristiže kada je međudolazno vrijeme >50 ms.

6. ANALIZA PROSJEČNOG VREMENA ČEKANJA PAKETA OVISNO O RAZLIČITIM PROMETNIM OPTEREĆENJIMA

U ovom radu je napravljena analiza prosječnog vremena čekanja paketa za tri klase s različitim brojem i veličinom paketa kroz tri simulacije. Vremena su analizirana za slučaj kada je u čvoru implementirana PQ metoda prioritetnog posluživanja.

Na sljedećim grafovima su prikazani rezultati analize triju simulacija koje su izvedene, a od koje svaka ima tri klase sa različitim ulaznim vrijednostima.

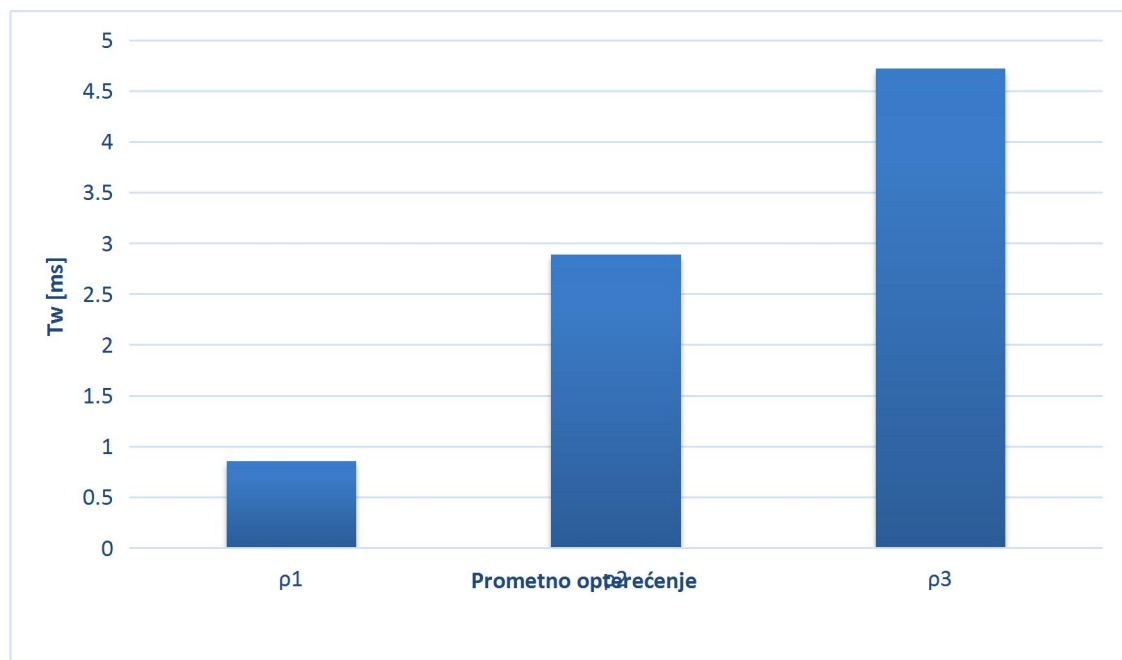
Prva simulacija se sastoji od tri klase. Prva klasa ima 50 paketa, druga klasa 44 paketa, dok ih u trećoj klasi ima 41. Svaka klasa ima različita vremena dolaska paketa u čvor, ali je svakoj klasi zajedničko to što zadnji paket pristiže unutar 1297 ms.

Druga simulacija, također ima tri klase. Prva klasa ima 41 paket, u drugoj klasi se nalazi 40 paketa, dok treća klasa ima 39 paketa.

Nadalje, u trećoj simulaciji isto tako imamo tri klase, te u svaku od njih je pristigao određeni broj paketa u različitom vremenu. Prva klasa ima 58 paketa, druga klasa 54 paketa, dok treća klasa ima 46 paketa.

6.1. Analiza odnosa prometnog opterećenja i vremena čekanja kod prve klase

Kroz ovo poglavlje će biti prikazana analiza prometnog opterećenja i vremena čekanja kod prve klase kroz sve tri simulacije.

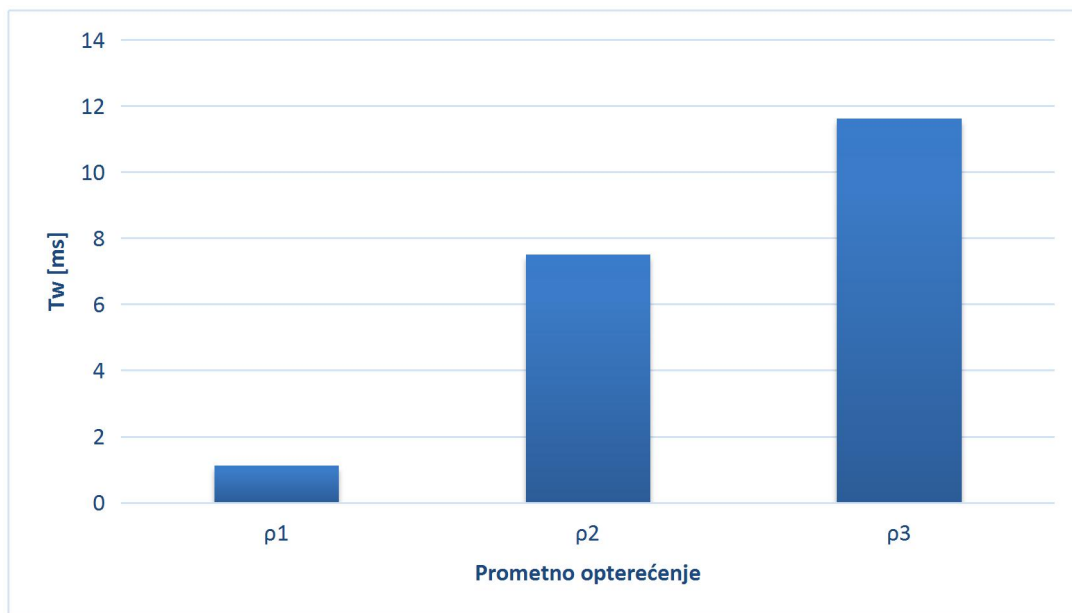


Graf 4. Odnos prometnog opterećenja i vremena čekanja kod prve klase

Na grafu 4 je prikazan odnos prosječnog prometnog opterećenja i vremena čekanja kod prve klase. Za prikaz su uzete prosječne vrijednosti prometnog opterećenja prve klase iz svake od tri simulacija koje su provedene, a koje iznose kako slijedi: $\rho_1 = 0,059$, $\rho_2 = 0,048$ i $\rho_3 =$

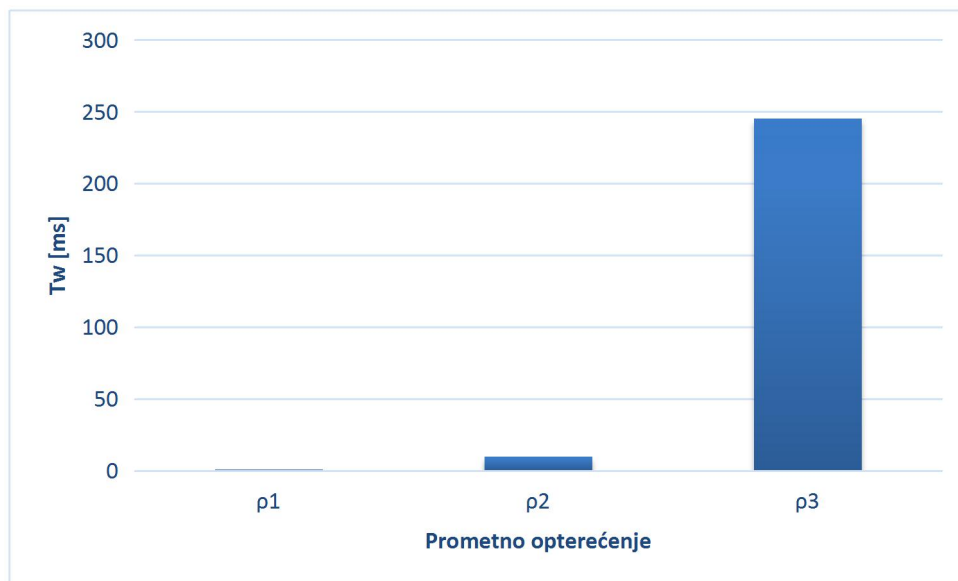
0,146, dok prosječna vremena čekanja imaju sljedeće vrijednosti: $T_{w_1} = 0,856$ ms, $T_{w_2} = 2,889$ ms i $T_{w_3} = 4,725$ ms.

Iz grafa 4 se može zaključiti da je prosječno vrijeme čekanja paketa na posluživanje najmanje kod prvog prometnog opterećenja, a najveće kod trećeg prometnog opterećenja što je zapravo i za očekivati s obzirom na to da se radi o metodi prioritetnog posluživanja te se pritom najprije poslužuju paketi iz prve klase, a onda iz druge i treće.



Graf 5. Odnos prometnog opterećenja i vremena čekanja kod druge klase

Graf 5 daje prikaz prosječnog prometnog opterećenja i vremena čekanja kod druge klase. U odnosu na prethodni graf može se primijetiti da je prvo prometno opterećenje u drugoj klasi druge simulacije manje nego kod prve klase u prvoj simulaciji, a razlog tomu je manji broj paketa koji je pristigao u čvor i međudolazna vremena u pojedinoj klasi. Za ovaj graf su uzete sljedeće vrijednosti za prometno opterećenje: $\rho_1 = 0,102$, $\rho_2 = 0,246$ i $\rho_3 = 0,420$, te za prosječno vrijeme čekanja: $T_{w_1} = 1,132$ ms, $T_{w_2} = 7,515$ ms i $T_{w_3} = 11,629$ ms.

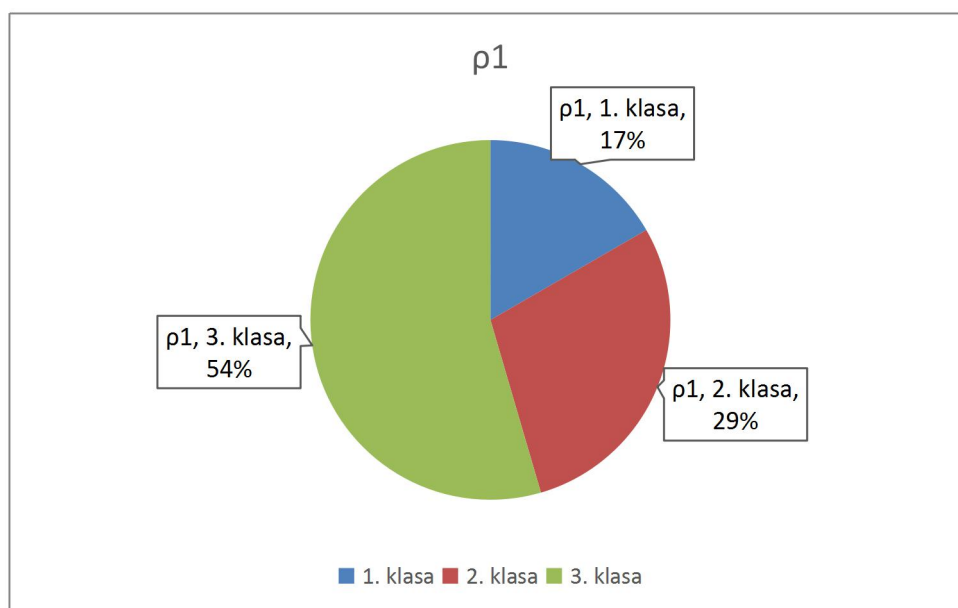


Graf 6. Odnos prometnog opterećenja i vremena čekanja kod treće klase

Graf 6. prikazuje isto tako odnos prometnog opterećenja i vremena čekanja, kao i prethodna dva grafa. Iako u svakoj simulaciji treća klasa ima najmanje pristiglih paketa u čvor, ima najveće vrijeme čekanja u odnosu na prethodne klase u provedenim simulacijama. Vrijednosti prometnog opterećenja koje su korištene u ovom grafu su: $\rho_1 = 0,193$, $\rho_2 = 0,327$ i $\rho_3 = 0,388$, a za vrijeme čekanja su uzete prosječne vrijednosti: $T_{w_1} = 0,974$ ms, $T_{w_2} = 9,667$ ms i $T_{w_3} = 245,477$ ms. U ovoj klasi možemo primijetiti da u odnosu na prethodne dvije klase

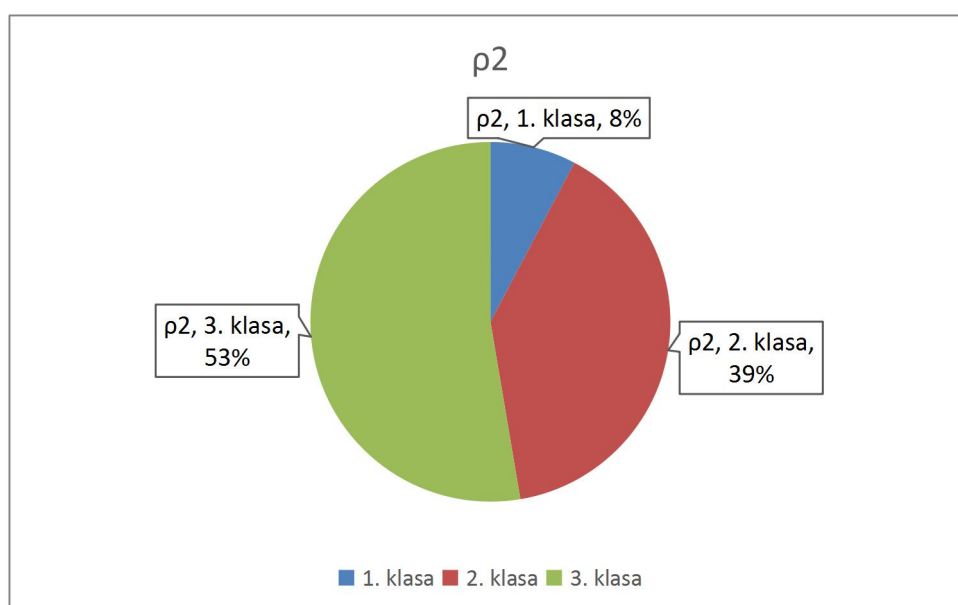
6.2. Analiza prosječnog prometnog opterećenja pojedinih klasa

Kroz ovo poglavlje će biti prikazana analiza prometnog opterećenja kod pojedinih klasa iz sve tri simulacije.



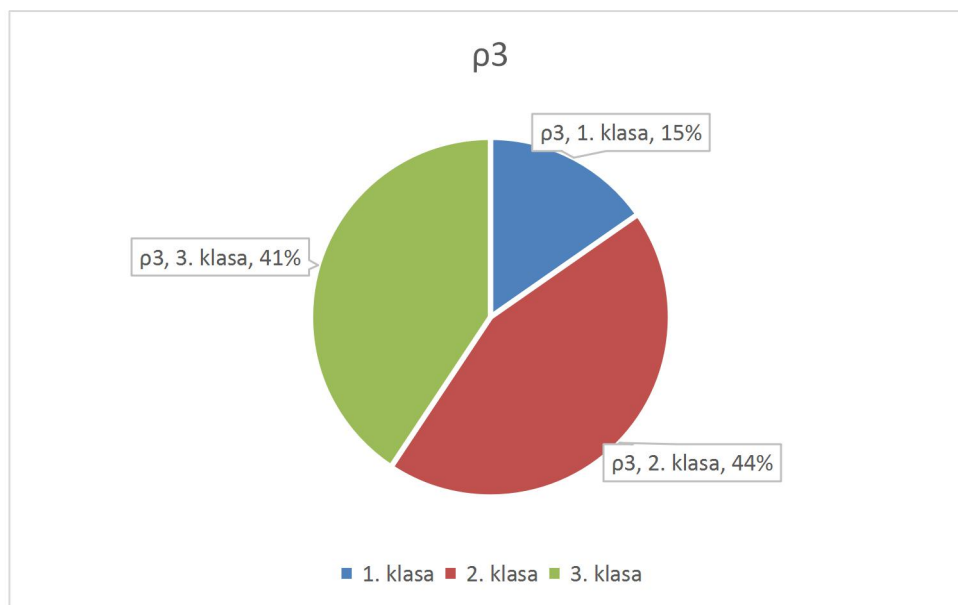
Graf 7. Udio prosječnog prometnog opterećenja pojedinih klasa u ukupnom prometnom opterećenju u prvoj simulaciji

Za ovaj graf su uzete u obzir vrijednosti prosječnog prometnog opterećenja iz sve tri simulacije za prvu klasu, te su prikazane u obliku ovog grafa, tzv. „pite“ iz kojeg se može iščitati udio prometnog opterećenja iz svake klase. ρ_A čija vrijednost iznosi 0,059 zauzima 17% od ukupnog udjela svih triju klasa. ρ_B čija vrijednost iznosi 0,102 zauzima 29% ukupnog udjela, dok ρ_C čija je vrijednost 0,193 zauzima najveći udio od 54% što govori da zapravo treća klasa ima najveće prometno opterećenje. U prvoj klasi kod treće simulacije duljina paketa je najveća, što se i odrazilo na udio koji prva klasa zauzima u trećoj simulaciji u odnosu na prvu klasu u drugoj i prvoj simulaciji.



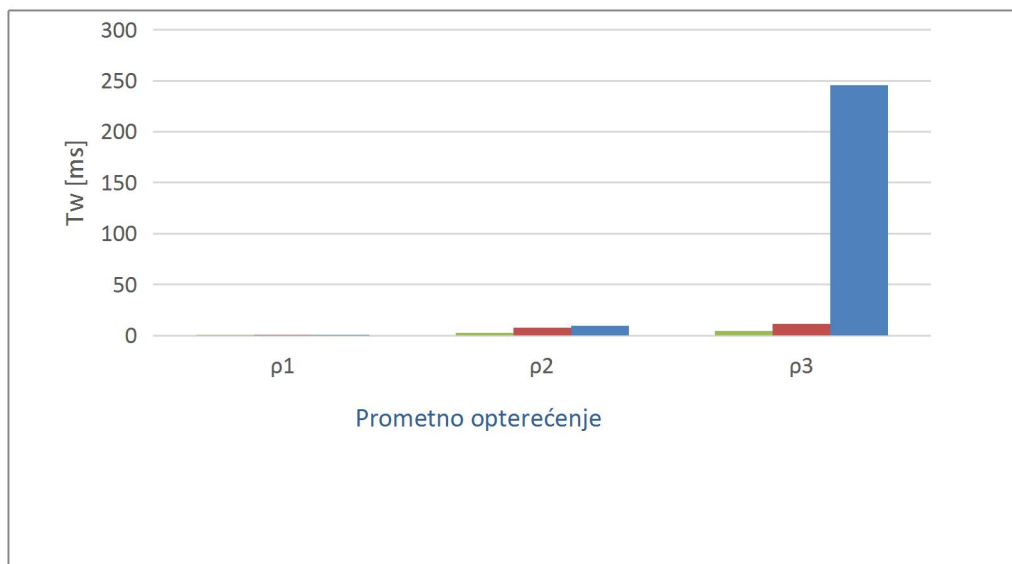
Graf 8. Udio prosječnog prometnog opterećenja pojedinih klasa u ukupnom prometnom opterećenju u drugoj simulaciji

Za ovaj graf su uzete u obzir vrijednosti prosječnog prometnog opterećenja iz svake simulacije za drugu klasu, te iz priloženog možemo vidjeti da se zapravo udio prve klase u odnosu na prethodnu smanjio za 9%, udio druge klase u odnosu na prethodnu se je povećao za 10%, a treća klasa je gotovo ista kao i u prethodnom grafu i razlika je 1%, odnosno ovdje iznosi 53% ukupnog udjela. Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti, da je treća klasa i dalje vodeća što se prometnog opterećenja, dok druga i prva klasa variraju u odnosu na prethodni graf.



Graf 9. Udio prosječnog prometnog opterećenja pojedinih klasa u ukupnom prometnom opterećenju u trećoj simulaciji

Graf 9 prikazuje malo drugačiju situaciju što se tiče prometnog opterećenja. Može se primijetiti da je druga klasa zauzela najveći udio što se tiče prometnog opterećenja. Kao što je i na grafu prikazano slijedi da prva klasa u kojoj ρ_A iznosi 0,146 zauzima 15% ukupnog udjela svih triju klasa što je u odnosu na drugu klasu manje za 2%, a u odnosu na prvu klasu više za 7%. Druga klasa ima vrijednost ρ_B koja iznosi 0,42 i zauzima 44% od ukupnog udjela. Može se primijetiti da druga klasa ima zapravo najveće prometno opterećenje, te u odnosu na drugu klasu u prethodne dvije simulacije ima najveće opterećenje. Treća klasa čiji ρ_C iznosi 0,388 a zauzima 41%.

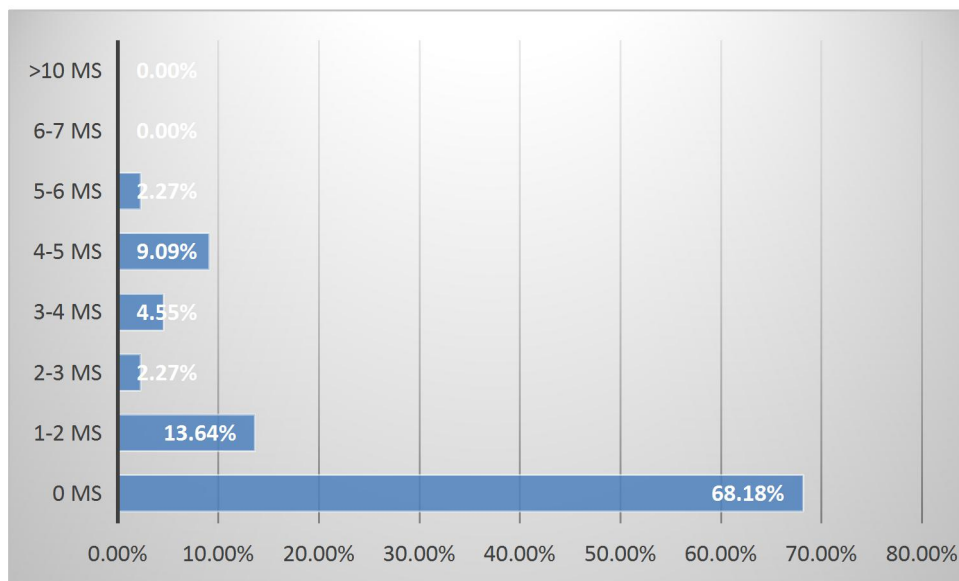


Graf 10. Usporedba prometnog opterećenja i vremena čekanja kod sve tri klase u sve tri simulacije

Na grafu 10 su objedinjene sve tri simulacije kako bi se mogli usporediti rezultati svih triju simulacija i pripadajućih im klasa. Tako se može reći da u svakoj simulaciji paketi koji su pristigli u čvor paketne mreže, a nalaze se u prvoj klasi, imaju najmanje prosječno vrijeme čekanja i najmanje prometno opterećenje. Nadalje druga klasa ima nešto veće prosječno vrijeme čekanja paketa na posluživanje, te sukladno tome su i duljine paketa veće u odnosu na prvu klasu, što dovodi do isto tako većeg prometnog opterećenja. Kako vrijeme čekanja u prethodne dvije simulacije kod treće klase konstantno raste, može se primijetiti da treća klasa u trećoj simulaciji uvelike odstupa u odnosu na prve dvije klase. Razlog tomu su mali broj paketa koji pristiže u čvor, veliko prosječno vrijeme čekanja paketa na posluživanje i velika duljina paketa.

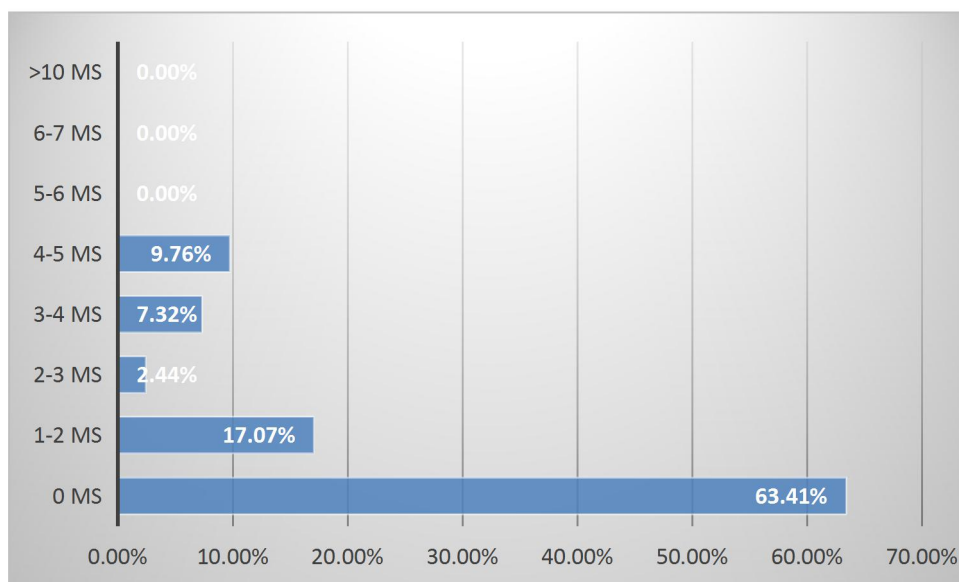
6.3. Analiza razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje

Ovo potpoglavlje nam daje uvid u analizu razdiobe vremena čekanja paketa koji se trebaju poslužiti, a isto je prikazano kroz devet grafova.



Graf 11. Prikaz razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje kod prve klase u prvoj simulaciji

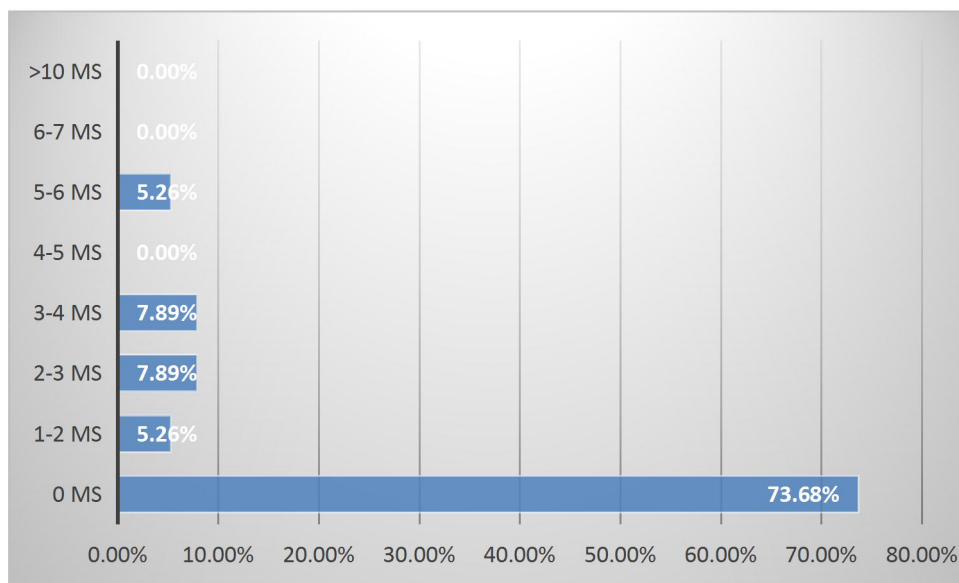
Graf 11 daje prikaz udio paketa ovisno o razredima vremena čekanja na posluživanje. Iz grafa se može iščitati da je zapravo najveći postotak paketa koji je pristigao u čvor na posluživanje čekao 0 ms, odnosno bili su odmah posluženi. U intervalu od 1-2 ms je čekalo 13,64% paketa, 2,27% u intervalu od 2-3 ms, u intervalu od 3-4 ms ih je bilo 4,55% i u intervalu od 4-6 ms 11,36 ms. Kao što je i na grafu vidljivo u intervalu od 6-7 ms, te intervalu >10 ms nije niti jedan paket čekao, što znači da su svi paketi koji su pristigli u čvor posluženi do 6 ms.



Graf 12. Prikaz razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje kod druge klase u prvoj simulaciji

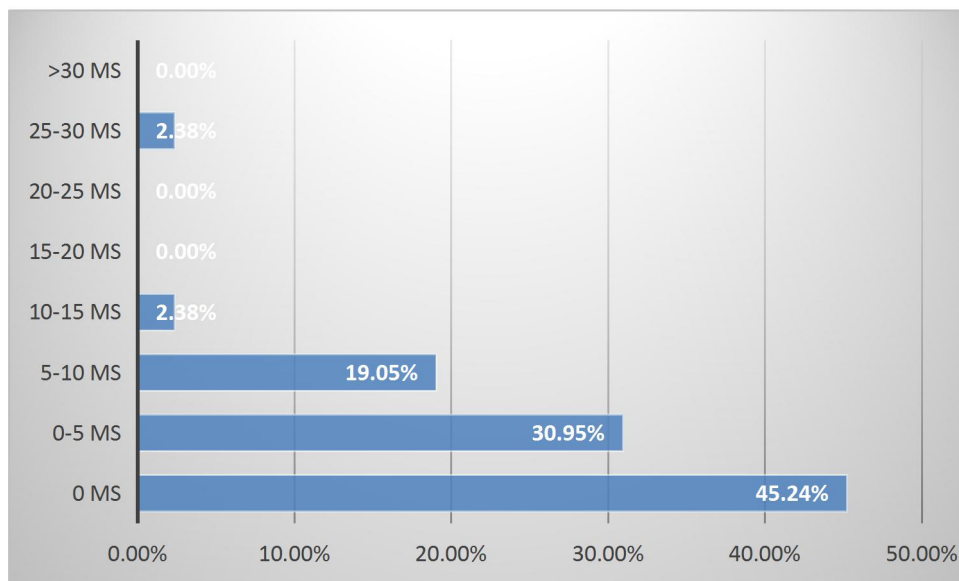
Kod druge klase u prvoj simulaciji je sličan slučaj kao i kod prve klase jer, kao što se može vidjeti na grafu 12, 63,41% paketa pristiglih u čvor je posluženo odmah, bez čekanja. U

intervalu od 1-2 ms čeka 17,07% paketa na posluživanje što je u odnosu na prvu klasu za isti interval za 3,43% više. U intervalu od 2-3 ms u drugoj klasi čeka 2,44% paketa na posluživanje što je u odnosu na prethodnu klasu gotovo pa zanemariva razlika od 0,17%. Interval od 3-4 ms bilježi 7,32% posto paketa koji čeka na posluživanje nakon pristizanja u čvor paketne mreže što je u odnosu na prvu klasu više za 2,55%. To govori da paketi prve klase u tom intervalu čekaju manje na posluživanje, što je i za očekivati jer se radi o metodi prioritetnog posluživanja. U intervalu od 4-5 ms isto tako je zanemariva razlika u postotku što se čekanja paketa na posluživanje tiče, jer u drugoj klasi imamo 9,76% paketa na čekanju, a u prvoj klasi 9,09%. U intervalu od 5-6 ms, 6-7 ms, i >10 ms u drugoj klasi nema paketa na čekanju, već su svi odmah posluženi.



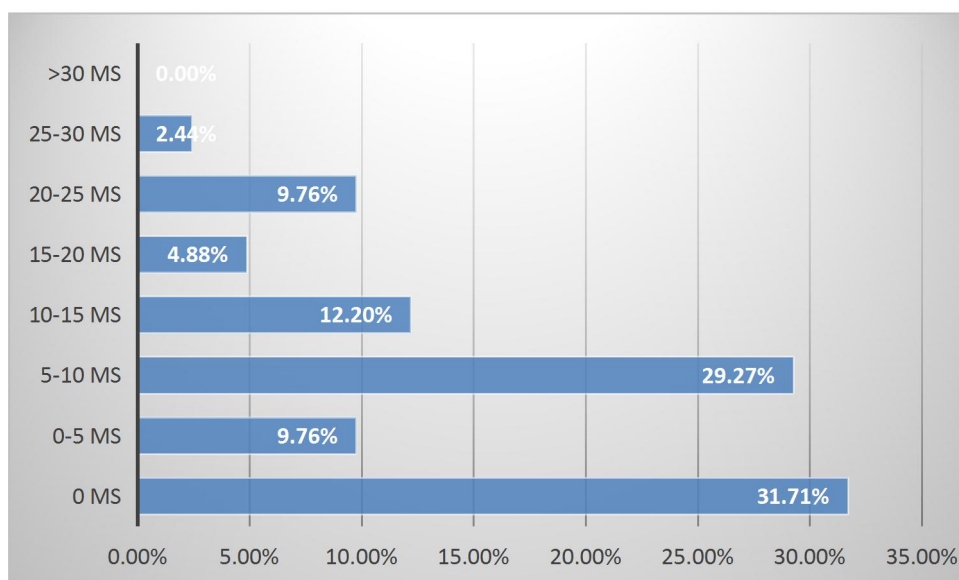
Graf 13. Prikaz razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje kod treće klase u prvoj simulaciji

U trećoj klasi kod prve simulacije vidi se najbolji učinak u odnosu na prethodne dvije klase, što se tiče posluživanja paketa odmah po pristizanju u čvor. Kao što sami graf prikazuje čak 73,68% paketa koji su pristigli u čvor je odmah i poslužen, bez čekanja. U vremenu od 1-2 ms je čekalo 5,26% što je u odnosu na prethodne dvije klase najmanji postotak čekanja na posluživanje. U vremenu od 2-3 ms i od 3-4 ms vidljiv je isti postotak paketa koji čeka na posluživanje, a iznosi 7,89%. U ovoj klasi u intervalu od 4-5 ms nema paketa koji čekaju na posluživanje u odnosu na prve dvije klase gdje se u tom intervalu nalaze paketi koji čekaju na posluživanje. Zatim je u intervalu od 5-6 ms 5,26% paketa koji čekaju na posluživanje, što je više nego u prvoj klasi, dok u drugoj klasi nema paketa koji čekaju na posluživanje u tom intervalu. Kao i u prethodne dvije klase, niti u ovoj nema paketa koji, u intervalu od 6-7 ms i >10 ms, čekaju na posluživanje, a razlog tomu je zato što je u njoj ro najmanji.



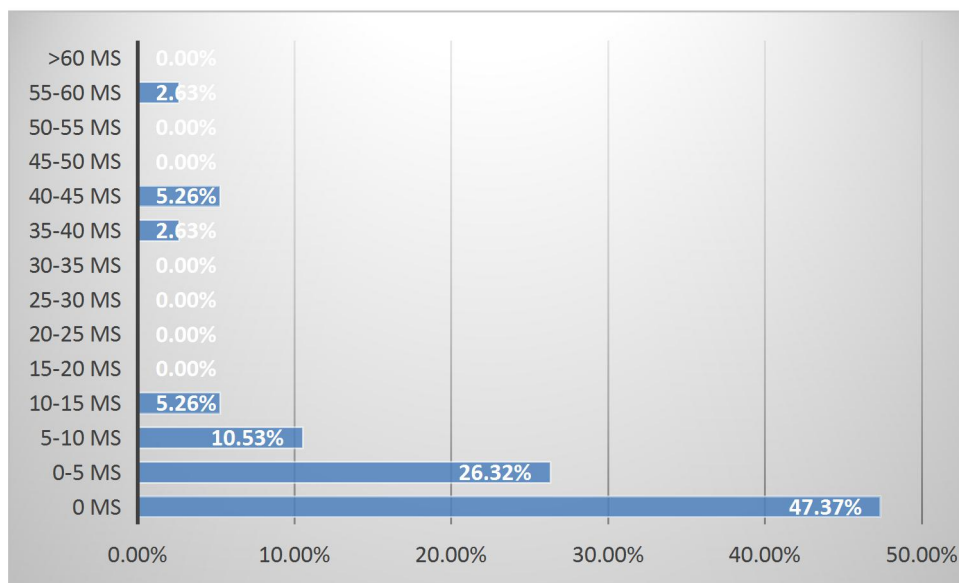
Graf 14. Prikaz razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje kod prve klase u drugoj simulaciji

Kod prve klase u drugoj simulaciji od ukupnog broja paketa koji su pristigli u čvor na posluživanje, njih 45,24% nije uopće čekalo, te je posluženo odmah po dolasku u čvor. Zatim je u intervalu od 0-5 ms na posluživanje čekalo 30,95% paketa, pa potom u intervalu od 5-10 ms gdje čeka 19,05% paketa na posluživanje. U intervalu od 10-15 ms čeka jako mali broj paketa na posluživanje, isto kao i u intervalu od 25-30 ms. U intervalima od 15-20 ms, 20-25 ms i >30 ms nema paketa koji čekaju na posluživanje. Iz ovog grafa može se zaključiti da je 95,24% paketa koji su pristigli u čvor čekalo najkasnije do 10 ms.



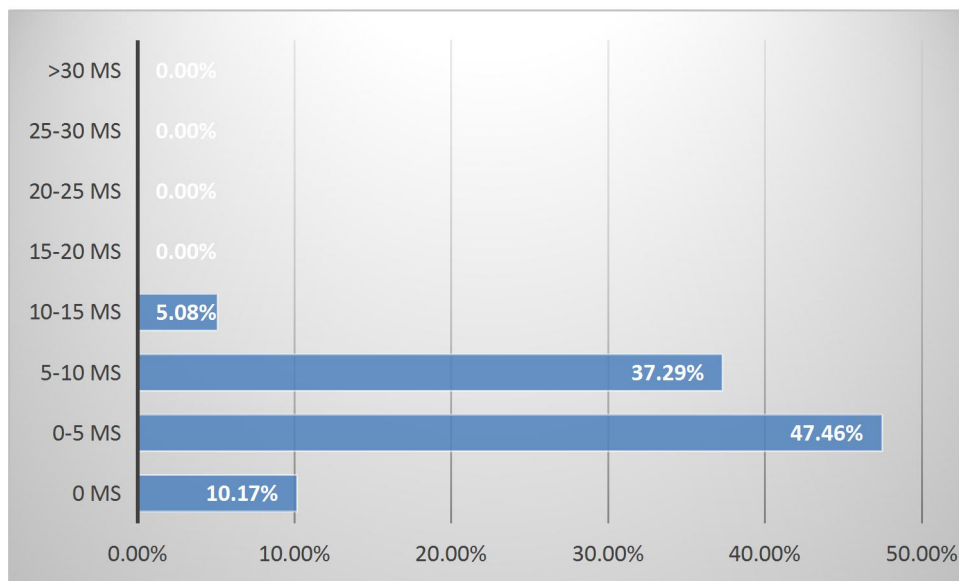
Graf 15. Prikaz razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje kod druge klase u drugoj simulaciji

Kod druge klase, u odnosu na prvu, u svakom intervalu postoje pakete koji čekaju na posluživanje. Od svih paketa koji su pristigli u čvor, njih 31,7% je poslužen bez čekanja što je malo više nego kod prve klase. Njih 9,76% je čekalo između 0-5ms što je puno bolji rezultat nego kod prve klase gdje u tom intervalu čeka 30,95% paketa. U intervalu od 5-10 ms čeka njih 29,27%, što je u odnosu na prethodnu klasu 10,22% više. Nadalje, 12,20% paketa čeka u intervalu od 10-15 ms, njih 4,88% čeka u intervalu od 15-20 ms, 9,76% u intervalu od 20-25 ms i naposljetku u intervalu od 25-30 ms njih 2,4%. U ovoj klasi, isto kao i u prethodnoj u intervalu >30 ms nema paketa koji čekaju na posluživanje.



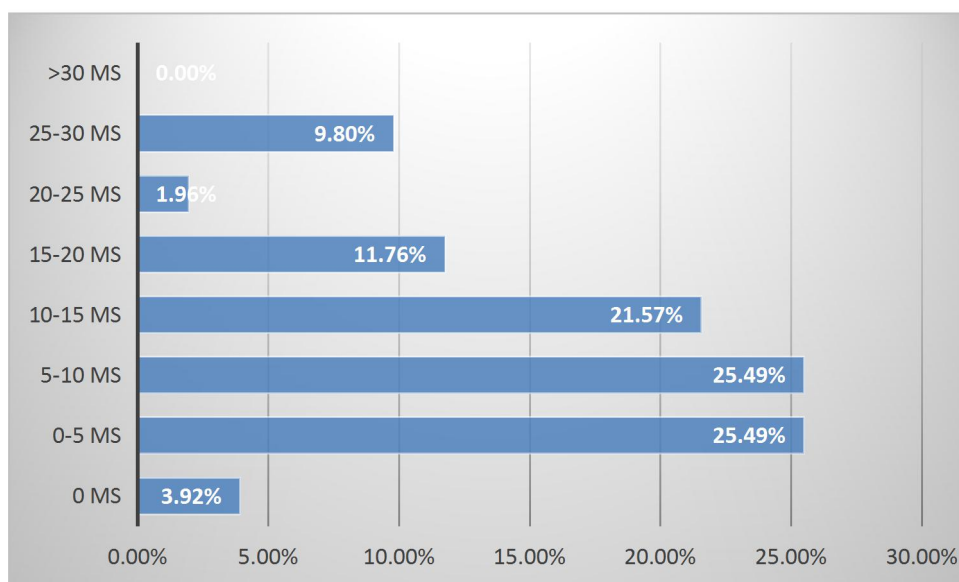
Graf 16. Prikaz razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje kod treće klase u drugoj simulaciji

Graf 16. isto tako prikazuje vrijeme čekanja na posluživanje paketa pristiglih u čvor. Prema dobivenim rezultatima može se vidjeti da najveći postotak paketa, njih 47,37% koji su pristigli u čvor uopće ne čeka na posluživanje. U intervalu od 0-5 ms čeka 26,32% paketa na posluživanje što je u odnosu na drugu klasu čak 16,56% više. Zatim u intervalu od 5-10 ms i 10-15 ms ima ukupno 15,79% paketa koji čekaju u bufferu kako bi bili posluženi. Kao što se može na samome grafu iščitati u intervalu od 15-35 ms nema paketa koji čekaju, pa se potom u intervalu od 35-40% pojavio mali broj, tj. njih 2,63% koji čekaju. Zatim u intervalu od 40-45 ms imamo 5,26%, a u intervalima od 45-50 ms i 50-55 ms nema paketa koji čekaju. Naposljetku, u intervalu od 55-60 ms čeka 2,63% paketa.



Graf 17. Prikaz razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje kod prve klase u trećoj simulaciji

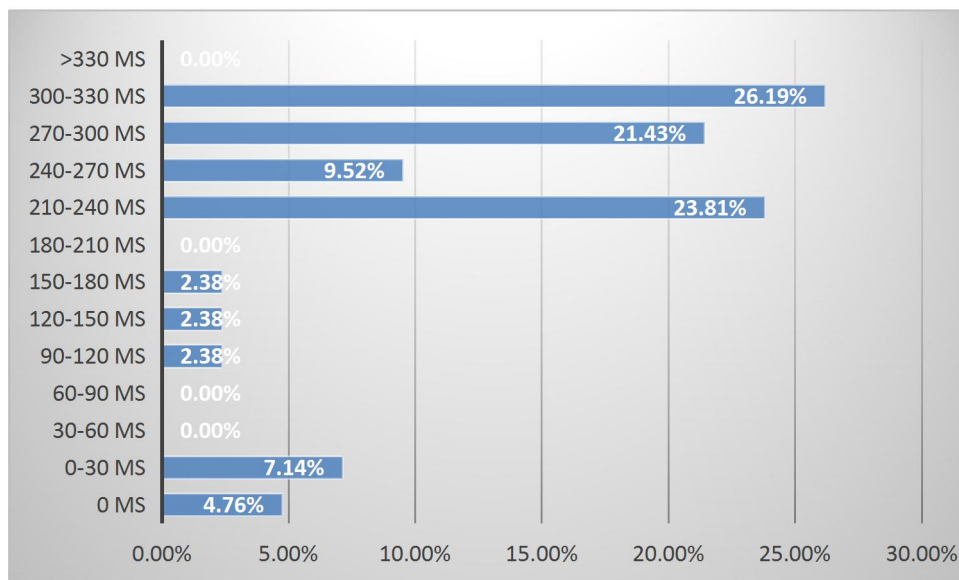
U trećoj simulaciji isto tako su tri klase paketa, kao i u prethodne dvije simulacije. U prvoj klasi se čekanje paketa na posluživanje podijelilo u četiri intervala. 10,17% paketa od ukupnih 100% što pristigne u čvor, odmah bivaju posluženi i ne moraju čekati. Za interval od 0-5 ms je zabilježeno 47,46% paketa koji moraju čekati kako bi bili posluženi, zatim u intervalu od 5-10 ms čeka 37,29% paketa, u intervalu od 10-15 ms 5,08% paketa. U intervalima većim od 30 ms nije bilo paketa.



Graf 18. Prikaz razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje kod druge klase u trećoj simulaciji

Na grafu 18 je isto tako prikaz vremena čekanja paketa u pojedinim vremenskim intervalima. Iz njega se može vidjeti da 3,92% paketa ne čeka uopće, te bude odmah poslužen što je u odnosu na prvu klasu manje za 6,25%. U periodu od 0-5 ms i 5-10 ms je

isti postotak paketa, od 25,49%, koji čekaju na posluživanje. U drugoj klasi također variraju čekanja paketa u prethodno navedenim intervalima u odnosu na prvu klasu. U intervalu od 10-15 ms čeka 21,57% paketa što je u odnosu na prvu klasu čak 16,49% više paketa. Zatim slijede intervali od 15-20 ms, od 20-25 ms i od 25-30 ms, te u svakom od njih se nalaze paketi koji čekaju na posluživanje, za razliku od prve klase gdje u tim intervalima nema paketa.



Graf 19. Prikaz razdiobe vremena čekanja paketa na posluživanje kod treće klase u trećoj simulaciji

Graf 19, kao što se može primijetiti, bitno odskaka od grafova prve i druge klase. Ovdje je zapravo obrnuta situacija. Najveći postotak paketa ima dulja vremena čekanja (>210 ms). Mali postotak paketa, njih 4,76%, što je gotovo pa isto u odnosu na prethodne dvije klase, ne mora čekati na posluživanje po dolasku u čvor, već su odmah posluženi. Zatim u rasponu od 0-30 ms gdje čeka 7,14% paketa što je u odnosu na prvu i drugu klasu gotovo zanemarivo. Ako se usporede sve tri klase može se primijetiti da u prvoj i drugoj klasi u intervalu čekanja od 0-30 ms budu posluženi svi paketi koji stignu u čvor pojedine klase, dok je u trećoj klasi u tom istom periodu posluženo samo 11,90% paketa. U ovoj klasi je najveće prosječno vrijeme čekanja na posluživanje i prometno opterećenje, te su iz tog razloga i periodi vremena čekanja tako veliki. U intervalu od 30-60 ms i 60-90 ms je čekalo 0% paketa, zatim u periodima od 90-120 ms, 120-150 ms i 150-180 ms imamo isti postotak paketa od 2,38% koji čekaju na posluživanje. Zatim u intervalu od 180-210 ms je 0% paketa imalo čekanje, te preostalih 80,95% čeka u periodu od 210-330 ms.

7.ZAKLJUČAK

Prioritetni red čekanja može se koristiti za upravljanje s ograničenim resursima kao što je širina pojasa na prijenosnoj liniji s mrežnog usmjerivača. U slučaju čekanja u odlaznom prometu zbog nedovoljne širine pojasa, svi drugi redovi mogu se zaustaviti za slanje prometa iz reda s najvećim prioritetom. To osigurava prosljeđivanje prioritetnog prometa s najmanje kašnjenja i najmanje vjerojatnosti odbacivanja zbog reda koji doseže maksimalni kapacitet. Svi ostali promet mogu biti posluženi kada je red čekanja s najvišim prioritetom prazan. Kod metode prioritetnog posluživanja, paketi koji imaju visoki prioritet poslužuju se prije paketa s niskim prioritetom. Ako dva paketa imaju isti prioritet, poslužuju se prema redoslijedu u redu čekanja.

Na temelju istraživanja PQ metode posluživanja dobiveni su određeni rezultati, koji su prezentirani kroz rad. Analiza vremena čekanja je provedena na 413 paketa koji su svrstani u tri klase koje su analizirane u tri različite simulacije. U svakoj simulaciji je bio isti prijenosni kapacitet od 1 Mbit/s, a za svaku simulaciju je različito prometno opterećenje, $\rho_{1uk} = 0,354$, $\rho_{2uk} = 0,621$, $\rho_{3uk} = 0,954$. Kroz ovaj rad su prikazani rezultati za sve tri simulacije, iz čega se može zaključiti da treća klasa u trećoj simulaciji ima najdulje vrijeme čekanja paketa na posluživanje zbog najveće prosječne duljine paketa koji su pristigli i čekaju u čvoru. Metoda prioritetnog posluživanja daje prednost za pakete koji imaju veći prioritet tako što ih odmah po dolasku u čvor poslužuje, a u ovom slučaju to su prve i druge klase u sve tri simulacije. No problem se stvara kod treće klase, pogotovo u trećoj simulaciji gdje su dugačka čekanja paketa, od 245,47 ms, na posluživanje. U čvor paketne mreže kod ove klase pristiglo je najviše paketa u usporedbi sa trećim klasama u prve dvije simulacije.

Kao što je u radu i prikazano, postoje tri simulacije od kojih svaka ima po tri klase, te kod svake pojedine klase zadnji paket pristiže u čvor u 1297 ms. Za prvu simulaciju je $\rho_{uk} = 0,3$, i najčešće je slučaj da su paketi, njih preko 60%, koji su pristigli u čvor odmah i posluženi. U vremenskom periodu od 5-6 ms završilo je čekanje paketa koji su pristigli u čvor. Kod druge simulacije, gdje je $\rho_{uk} = 0,6$ gotovo je isti slučaj kao i kod prve simulacije, jer se najveći postotak paketa koji je pristigao poslužuje odmah po ulasku u čvor, iako je u odnosu na prvu simulaciju taj postotak u prosjeku manji za oko 20%. Nadalje kod treće simulacije, $\rho_{uk} = 0,9$, a koja u odnosu na prethodne dvije simulacije ima najmanji postotak paketa koji su posluženi odmah po dolasku u čvor. Najveći postotak paketa koji je poslužen odmah po dolasku u čvor je bio kod prve klase u postotku od 10,17%. Paketi treće klase su najdulje čekali jer su zadnji paketi u čvoru (najveći broj njih) bili posluženi nakon što su proveli u redu čekanja između 300-330 ms. Iz ovih rezultata može se zaključiti da u trenutku kada je prometno opterećenje najveće ($\rho_{uk} = 0,9$), tada su najveća čekanja paketa na posluživanje kada se radi o prioritetnoj metodi posluživanja. Dobiveni rezultati za sve tri simulacije zapravo se mogu povezati sa kvalitetom usluge koja je jedan od ključnih čimbenika kod višeuslužnih mreža. Može se zaključiti da su klase u kojima je međudolazno vrijeme između pojedinih paketa malo da se paketi brže poslužuju što izravno utječe na samu kvalitetu usluge.

LITERATURA

Wood, R.: Next Generation Network Services, Cisco Press, 2005.

http://www.e-tutes.com/lesson13/networking_fundamentals_lesson13_3.htm (srpanj 2017.)

[3] Popović, Ž.: Od telegrafskih do paketnih komutacijskih sustava, Ericsson Nikola Tesla, Revija 17, 2004, p. 10-11

[4] <https://www.croc.ru/eng/solution/ikt-infrastructure/communications/ngn/?&tab=64717> (srpanj 2017.)

[5] Mesh, R.: Multi-Service Broadband Network Architecture, NextGen 13, London, October 2013

[6] <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=426645> (siječanj 2018.)

[7] <http://searchnetworking.techtarget.com/definition/OSI> (siječanj 2018.)

[8] <https://sysportal.carnet.hr/node/352> (siječanj 2018.)

[9] http://www.phy.pmf.unizg.hr/~dandroic/nastava/ramr/poglavlje_2.pdf

[10] Bošnjak, I.: Telekomunikacijski promet II, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2001.

[11] <http://searchnetworking.techtarget.com/definition/TCP-IP> (siječanj 2018.)

[12] <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/routing-information-protocol-rip/13769-5.html#tcp> (siječanj 2018.)

[13] <https://issuu.com/vsmti/docs/rm-predavanja> (veljača 2018.)

[14] <https://de.scribd.com/document/195955514/Komutacija-i-Upravljanje-u-Telekomunikacijskoj-Mrezi> (veljača 2018.)

[15] Alsawaai, A.S.M.: *Performance Modelling and Analysis of Weighted Fair Queueing for Scheduling in Communication Networks*, 2010.,

[16] https://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_0t/12_0t5/feature/guide/cbwfq.html#wp17641 (veljača 2018.)

[17] <http://www.moreprocess.com/process-2/first-come-first-served-fcfs-round-robin-scheduling-algorithm> (ožujak 2018.)

[18] <https://www.techopedia.com/definition/23455/first-come-first-served-fcfs> (ožujak 2018.)

[19] <https://embeddedthoughts.com/tag/fifo/> (ožujak 2018.)

[20] Rami J. Matarneh: „Self-Adjustment Time Quantum in Round Robin Algorithm Depending on Burst Time of the Now Running Processes“, Department of Management Information Systems, Faculty of Administrative and Financial Sciences, Al-Isra Private University, P.O. 11622, Amman, Jordan

[21] <https://thecustomizewindows.com/2013/03/round-robin-scheduling-and-disambiguation-of-round-robin/> (ožujak 2018.)

- [22] Chuprikov, P., Nikolenko, S.I., Davydow A., Kogan, K.: „*Priority Queueing for Packets with Two Characteristics*“
- [23] Radovan, M.: *Računalne mreže (I)*, 1. izdanje, Digital Point, Rijeka, 2010., str. 35
- [24] <http://mreze.layer-x.com/s040100-0.html> (ožujak 2018.)
- [25] <https://www.inf.uniri.hr/~mradovan/rm1docs/RM1p1.docx> (travanj 2018.)
- [26] <https://sites.google.com/site/amitsciscozone/home/qos/priority-queueing> (travanj 2018.)
- [27] <https://www.paloaltonetworks.com/documentation/71/pan-os/pan-os/quality-of-service/qos-priority-queueing> (travanj 2018.)
- [28] Mrvelj, Š.: *Promet u Internet mreži*, Autorizirana predavanja, FPZ, 2009.
- [29] Balogh, T., Medvecky, M.: *Comparison of Priority Queueing Based Scheduling Algorithms*, Vol.1, No. 1, April 2010
- [30] <http://thescipub.com/abstract/10.3844/ajassp.2009.1831.1837> (travanj 2018.)
- [31] But, J., Burriss, Sh., Armitage, G.: *Priority Queueing of Network Game Traffic over a DOCSIS Cable Modem Link*, Centre for Advanced Internet Architectures, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, December 2006.
- [32] Mrvelj, Š., Bošnjak, I.: *Primjeri i zadaci iz telekomunikacijskog prometa*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2001.

POPIS KRATICA

VoIP (*Voice over Internet Protocol*)

MSN (eng. *Multi-service networks*)

QoS (eng. *Quality of Service*)

ATM (eng. *Asynchronous Transfer Mode*)

FR (eng. *Frame Relay*)

IP (eng. *Internet Protocol*),

VPN (eng. *Virtual Private Networks*)

IP/MPLS (eng. *Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching*) ježgrene

NGN (eng. *New Generation Network*)

ITU-T (eng. *International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector*)

PSTN (eng. *Public Switched Telephone Network*)

B-ISDN (eng. *Broadband Integrated Services Digital Network*)

SONET (eng. *Synchronous Optical Network*)

SDH (eng. *Synchronous Digital Hierarchy*)

IP (eng. *Internet Protocol*)

xDSL (eng. *Digital Subscriber Line*),

xPON (eng. *Passive Optical Network*)

TDM (eng. *Time Division Multiplexing*)

OAM-a (eng. *Operations and Maintenance*)

FMC (eng. *Fixed Mobile Convergence*)

OSI (eng. *Open System Interconnection Basic Reference Model*)

ISO (eng. *International Organization for Standardization*)

Wi-Fi (eng. *Wireless Fidelity*)

TCP/IP (eng. *Transfer Control Protocol/Internet Protocol*)

ARPANET-u (eng. *Advanced Research Projects Agency Network*)

LAN (eng. *Local Area Network*)

ARP (eng. *Address Resolution Protocol*).

ICMP (eng. *Internet Protocol Control Message Protocol*)

UDP (eng. *User Datagram Protocol*)

HTTP (eng. *HyperText Transfer Protocol*)

FTP (eng. *File Transfer Protocol*),

POP3 (eng. *Post Office Protocol*),

SMTP (eng. *Simple Message Transfer Protocol*)

SNMP (eng. *Simple Network Management Protocol*)

PQ (eng. *Priority Queue*)

RR (eng. *Round Robin*)

FCFS (eng. *First Come First Served*)

WFQ (eng. *Weighted Fair Queue*)

CBWFQ (eng. *Class Based WFQ*)

SARR (eng. *Self Adjustment Round Robin*)

CPU (eng. *Central Processor Unit*)

FIFO (eng. *First In First Out*)

IPTV (eng. *Internet Protocol Television*)

POPIS SLIKA

Slika 1. Paketski bazirana višeuslužna mreža	2
Slika 2. Prikaz međusobnog povezivanja slojeva dva OSI modela	5
Slika 3. Prikaz OSI i TCP/IP modela	9
Slika 4. Slojevi na kojima mrežni čvor obavlja funkcije	10
Slika 5. Domaćini i prijenosnici	12
Slika 6. Prikaz komutacije kanala	13
Slika 7. Prikaz komutacije paketa	14
Slika 8. Prikaz prioritetnog posluživanja	16
Slika 9. RR algoritam	17
Slika 10. FIFO algoritam	18

POPIS GRAFIKONA

Graf 1. Međudolazno vrijeme u određenim intervalima kod treće klase u prvoj simulaciji

Graf 2. Međudolazno vrijeme u određenim intervalima kod treće klase u drugoj simulaciji

Graf 3. Međudolazno vrijeme u određenim intervalima kod treće klase u trećoj simulaciji

Graf 4. Odnos prometnog opterećenja i vremena čekanja kod prve klase

Graf 5. Odnos prometnog opterećenja i vremena čekanja kod druge klase

Graf 6. Odnos prometnog opterećenja i vremena čekanja kod treće klase

Graf 7. Prikaz prosječnog prometnog opterećenja u % za svaku pojedinu klasu

Graf 8. Prikaz prosječnog prometnog opterećenja u % za svaku pojedinu klasu

Graf 9. Prikaz prosječnog prometnog opterećenja u % za svaku pojedinu klasu

Graf 10. Usporedba prometnog opterećenja i vremena čekanja kod sve tri klase u sve tri simulacije

Graf 11. Prikaz vremena čekanja paketa na posluživanje kod prve klase u prvoj simulaciji

Graf 12. Prikaz vremena čekanja paketa na posluživanje kod prve klase u prvoj simulaciji

Graf 13. Prikaz vremena čekanja paketa na posluživanje kod prve klase u prvoj simulaciji

Graf 14. Prikaz vremena čekanja paketa na posluživanje kod prve klase u drugoj simulaciji

Graf 15. Prikaz vremena čekanja paketa na posluživanje kod druge klase u drugoj simulaciji

Graf 16. Prikaz vremena čekanja paketa na posluživanje kod treće klase u drugoj simulaciji

Graf 17. Prikaz vremena čekanja paketa na posluživanje kod prve klase u trećoj simulaciji

Graf 18. Prikaz vremena čekanja paketa na posluživanje kod druge klase u trećoj simulaciji

Graf 19. Prikaz vremena čekanja paketa na posluživanje kod treće klase u trećoj simulaciji